普通高等教育“十三五”规划教材

数控技术及应用

王侃夫　马丹　编著

Numerical Control Technology and Application

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

免费电子课件

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

普通高等教育“十三五”规划教材

数控技术及应用

王侃夫　马　丹　编著

机械工业出版社

本书以 FANUC 0i 和 SINUMERIK 802D sl 系统为依托，介绍了数控原理、数控机床机械传动、主轴和进给电气驱动、位置和速度检测、数控机床伺服系统、数控机床 PLC 以及数控加工程序编制等方面的内容。

本书涵盖了数控技术的各个方面，内容丰富，层次清晰，图文并茂，紧密结合工程实践，案例翔实。本书将数控技术及应用落实到具体的知识点和能力点上，以期学生对数控机床控制和数控加工有较全面的了解，提高数控机床的应用水平。本书附有大量思考题与习题，在着重掌握基本知识的基础上，拓展解决实际问题的能力。

本书既可作为普通高等学校机械设计制造及其自动化、机械电子工程、电气工程及其自动化等专业的教材，也可作为从事数控机床工作的工程技术人员的参考用书。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinacmp@163. com 索取，或登录 www.cmpedu.com 下载。

图书在版编目（CIP）数据

数控技术及应用/王侃夫，马丹编著. —北京：机械工业出版社，2017. 11

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-58213-7

Ⅰ. ①数…　Ⅱ. ①王…　②马…　Ⅲ. ①数控机床-高等学校-教材　Ⅳ. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 245539 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：吉　玲　责任编辑：吉　玲　李　超　王小东
责任校对：张　薇　封面设计：张　静
责任印制：常天培
唐山三艺印务有限公司印刷
2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm · 14. 25 印张 · 349 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-58213-7
定价：35.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：010-88379833
读者购书热线：010-88379649

网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金 书 网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版



前　言

随着工业 4.0 和中国制造 2025 步伐的推进，中国制造正在进行产业转型和升级，将从“制造业大国”走向“制造业强国”，社会和企业对工程技术应用型人才的需求量也越来越大，从而也大大推进了应用型本科教育的建设和改革。根据高等教育培养目标和要求，本书力图使学生学完后能获得作为现场工程师必须掌握的数控机床控制技术和加工编程等方面的基本理论和综合应用技术。

考虑到技术本科教育的特点和数控技术相关应用能力培养的要求，本书从应用的角度对数控机床的机械传动、电气驱动、伺服系统以及数控加工程序编制做了较为全面和细致的介绍。本书特色表现为以下几个方面：一是通过对数控机床控制技术的分解，紧密结合工程实际，将数控机床控制技术落实到具体的知识点和能力点上，配以大量图片和插图，在内容阐述上力求直接和直观，使教学更加贴近工作现场；二是理论联系实际，通过一定的设计计算和理论分析，结合实际工程案例，使学生了解数控机床或其他机电一体化设备的选择和调试方法，有利于学生将所学理论知识应用于工作岗位；三是在数控编程方面，通过大量案例介绍，学生可以灵活掌握数控指令的使用，提高实际应用能力；四是有较多的启发性思考题和应用性习题，尽量减少死记硬背的题型，要求学生灵活应用已学过的知识来解决实际问题，一些习题还具有知识拓展的功能，要求学生利用网络等媒介收集有关资料，拓宽思路；五是精心制作了与教材配套的课件，课件采用了大量与教学内容相匹配的实景图片，文字说明简洁明了，突出重点，既是对教材内容的补充，又可以提高教学的直观性，便于提高教学效率和增强教学效果。

在本书的编写过程中，作者跟踪数控技术的新发展，查阅了大量文献资料，并主持了多个数控机床改造和调试项目。作者将文献资料和实践体会进行整理和提炼，将部分成果编入教材相关章节中。另外，作为讲义在学校教学和企业培训中使用并获得良好效果的部分内容，经整理、补充和修改，已整合在本书中。

本书由上海电机学院的王侃夫（编写绪论、第 1、4、5、6、8、9、10、11 章）、上海电气自动化设计研究所有限公司的马丹（编写第 2、3、7 章）编写，全书由王侃夫统稿。宋又廉教授担任本书的主审，对书稿进行了认真、负责和全面的审阅，并提出了许多建设性的意见。另外，上海电机学院的梁森教授、上海电气上海重型机床厂有限公司的陈建新高级工程师、中航工业沈阳黎明航空发动机集团公司的陈颖高级工程师也对本书的编写提出了许多宝贵意见。本书在编写过程中，还得到了上海电气上海电机厂有限公司的柴家隆，上海电机学院工业中心、上海电气李斌技师学院、上海电气上海机床成套工程有限公司、上海电气上海汽轮机有限公司、上海三菱电梯有限公司、上海航天设备制造总厂、陕西法斯特齿轮有限责任公司、中国中车资阳机车有限公司等单位的大力支持，他们对本书的有关内容提出了许多宝贵意见，并提供了相关资料，作者在此一并表示衷心的感谢。

由于数控技术发展较快，作者水平有限，书中内容难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。作者的 E-mail：skwangkf@ 126.com。

编著者

目　录



前言

绪论 …… 1

0.1　机床数控技术 …… 1

0.2　数控机床的加工特点 …… 4

0.3　数控机床的基本控制 …… 5

0.4　数控技术的发展趋势 …… 7

0.5　本课程的任务和学习方法 …… 9

思考题与习题 …… 10

第1章　数控机床机械传动 …… 11

1.1　进给机械传动 …… 11

1.2　主轴机械传动 …… 19

1.3　辅助装置 …… 24

1.4　进给机械传动的特性 …… 31

思考题与习题 …… 36

第2章　主轴电动机及驱动 …… 38

2.1　三相交流异步电动机及变频调速 …… 38

2.2　由变频器组成的模拟主轴 …… 44

2.3　交流主轴电动机及驱动器 …… 47

2.4　主轴伺服功能 …… 54

2.5　主轴电动机的选择 …… 58

思考题与习题 …… 60

第3章　伺服电动机及驱动 …… 62

3.1　交流伺服电动机及驱动器 …… 62

3.2　伺服电动机及驱动器的选择 …… 71

思考题与习题 …… 74

第4章　位置和速度检测 …… 76

4.1　编码器 …… 76

4.2　光栅 …… 83

4.3　回参考点 …… 86

思考题与习题 …… 88

第5章　数控原理及系统 …… 90

5.1　数据处理及控制功能 …… 90

5.2　插补原理 …… 93

5.3　数控系统的组成 …… 99

5.4　典型数控系统介绍 …… 104

思考题与习题 …… 116

第6章　数控机床伺服系统 …… 118

6.1　伺服系统的类型及组成 …… 118

6.2　伺服系统的性能及补偿 …… 120

6.3　伺服系统的调整及优化 …… 124

思考题与习题 …… 129

第7章　数控机床 PLC 控制 …… 131

7.1　概述 …… 131

7.2　输入、输出开关信号 …… 132

7.3　FANUC 数控系统 PMC …… 138

7.4　SINUMERIK 802Dsl 数控系统 PLC …… 146

思考题与习题 …… 149

第8章　数控加工编程基础 …… 152

8.1　加工程序编制的内容和方法 …… 152

8.2　数控机床坐标系统 …… 155

思考题与习题 …… 162

第9章　数控车床加工程序 …… 164

9.1　数控车削基本指令 …… 164

9.2　车削固定循环 …… 172

思考题与习题 …… 187

第10章　数控铣床及加工中心加工程序 …… 189

10.1　铣削指令 …… 189

10.2　孔加工固定循环指令及子程序 …… 204

10.3　加工中心程序 …… 209

思考题与习题 …… 214

第11章　宏程序及自动编程 …… 216

11.1　宏程序 …… 216

11.2　自动编程 …… 220

思考题与习题 …… 223

参考文献 …… 224

绪　论



0.1　机床数控技术

1. 数控技术的基本概念

数控技术是指用数字指令来实现一台或多台机械设备运行的控制技术，数控技术所涉及的控制量通常是位置、角度、速度等机械量以及与机械能量流向有关的开关量。数控机床就是采用了数控技术的机床，是集机械制造、计算机、自动控制、电动机及拖动、电力电子、传感器、机床电器及PLC、气液压以及网络通信等技术为一体的自动化金属切削设备，是典型的机电一体的产品。机床数控技术包括机床本体、数控系统和外围技术，如图0-1所示。

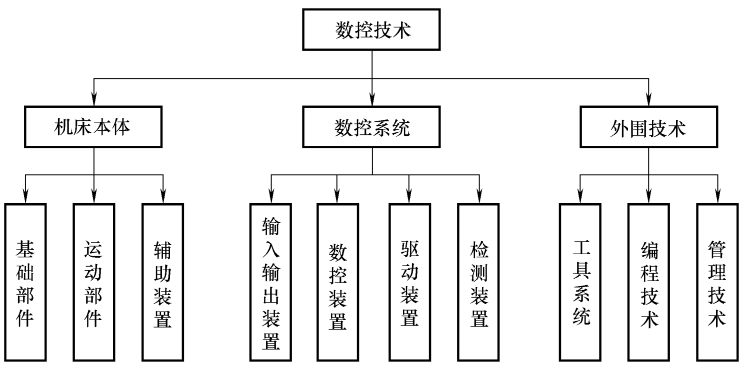


图0-1　机床数控技术组成

数控装置是数控技术的核心，是一种专门用于数控机床控制的计算机，承担着数控机床运行的数据输入、处理和计算，控制信号的输入和输出，以及网络通信。

2. 数控机床的类型

（1）数控车床　数控车床主要用于加工各种轴类、套筒类和盘类零件的回转表面，如内外圆柱面、圆锥面、成形回转表面及螺纹等。按主轴的配置形式不同，有卧式数控车床（主轴轴线处于水平位置）和立式数控车床（主轴轴线处于垂直位置）两种类型；按加工类型不同，常见的有普通型、普及型、多功能型等类型。普通型数控车床的数控系统功能较简单，能完成常规的车削加工，车床床身结构采用水平床身（图0-2a），主轴调速采用手动机械换档的有级调速或自动换档配合电气无级调速，自动换刀装置采用四方电动刀架，主轴卡盘采用手动卡盘或液压卡盘。普及型数控车床的数控系统同普通型类似，床身采用斜床身结构，主轴采用电气无级调速，自动换刀装置采用6、8、12工位的液压或电动转塔刀架，主

轴卡盘采用液压卡盘。多功能数控车床是在普及型数控车床上发展起来的，其数控系统的功能较强大，车床主轴具有定向控制及进给插补控制，自动换刀装置为配备有动力头的转塔刀架。多功能数控车床除了常规车削加工外，还能进行圆柱面或端面铣槽、圆柱面铣螺旋槽、端面钻孔和攻螺纹等特殊加工（图 1-2b）。



a)　　　　b)

图 0-2　数控车床

a）普通型数控车床（平床身）　b）多功能数控车床（斜床身）

（2）数控铣床及加工中心　数控铣床除了普通铣床的工艺性能外，还具有加工复杂平面和曲面轮廓的能力。数控铣床有立式数控铣床、卧式数控铣床和龙门铣床等类型。立式数控铣床的主轴轴线垂直于水平面，适用于盘、盖及模具等零件的加工，如图 0-3a 所示；卧式数控铣镗床的主轴轴线平行于水平面，为了扩大加工范围，通过增加数控转台使工件能够一次装夹完成所有面的加工，特别适合于加工复杂的箱体、泵体、阀体和壳体等零件，如图 0-3b 所示；数控龙门铣床是具有门式框架和卧式长床身的铣床，适用于大型零件的铣削加工，如图 0-3c 所示。

加工中心是在数控铣床的基础上发展而来的、带有刀库和自动换刀装置的多功能数控机床，它把铣削、镗削、钻削、攻螺纹及螺纹切削等功能集中在一台机床上。工件在加工中心上经一次装夹后，通过自动选刀和换刀，依次完成多工序的加工，大大提高了生产率。加工中心有立式加工中心（图 0-3d）、卧式加工中心（图 0-3e）及龙门式加工中心等类型，配备的刀库有斗笠式、圆盘式和链式等形式。

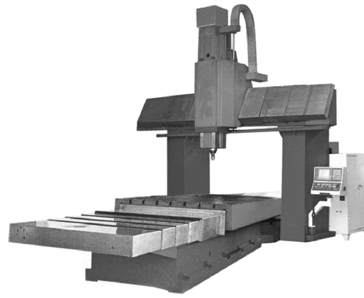
（3）数控磨床　数控磨床是利用磨具对工件表面进行磨削加工的机床。大多数的数控磨床使用高速旋转的砂轮进行磨削加工。数控磨床有数控平面磨床（图 0-4a）、数控外圆磨床（图 0-4b）、数控内圆磨床及数控成形磨床等类型。

（4）数控电火花成形机床和线切割机床　数控电火花成形机床是利用两个不同极性的电极在绝缘液体中产生放电进行去除材料的加工的机床，特别适用于形状复杂的模具及难加工材料的加工，如图 0-5 所示。

电火花线切割加工简称“线切割”。它采用电极丝（钼丝、钨钼丝等）作为工具电极，一方面，在脉冲电源的作用下，工具电极和加工工件之间形成火花放电，火花瞬间产生大量的热，使工件表面熔化甚至汽化；另一方面，电极丝沿着预定的轨迹运动，从而完成零件轮廓的切割，如图 0-6 所示。数控电火花成形机床和线切割机床在模具加工领域得到广泛应用。


a)


b)


c)


d)

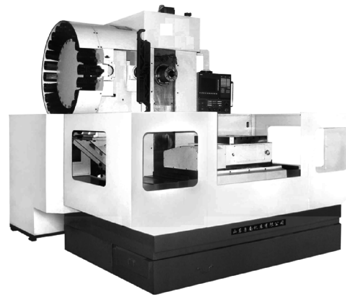

e)

图 0-3　数控铣床和加工中心

a）立式数控铣床　b）数控卧式铣镗床　c）数控龙门铣床　d）立式加工中心　e）卧式加工中心


a)

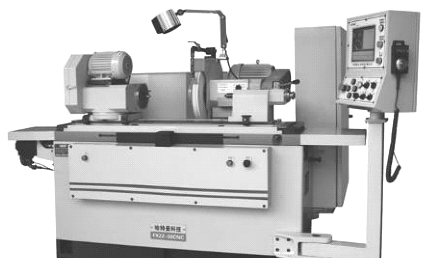

b)

图 0-4　数控磨床

a）数控平面磨床　b）数控外圆磨床

（5）数控压力机和数控折弯机　数控压力机用于各类金属薄板零件的加工，通过简单的冲模组合可一次性地自动完成多种复杂孔型和浅拉伸成形加工，也可以用小冲模以步进方式冲大的圆孔、方形孔、腰形孔及各种形状的孔，如图 0-7 所示。数控折弯机是一种通过凹凸模对金属薄板进行折弯成形的加工设备，如图 0-8 所示。

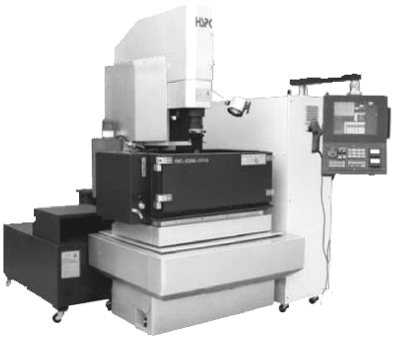


图 0-5　数控电火花成形机床



图 0-6　数控线切割机床



图 0-7　数控压力机



图 0-8　数控折弯机

其他数控机床还有数控激光切割机和数控火焰切割机等。本教材涉及的数控技术及应用以数控车床、数控铣床和加工中心为主。

0.2　数控机床的加工特点

相对于普通机床而言，数控机床加工零件是根据加工程序自动进行的，以数控车床为例，其零件加工过程如图 0-9 所示。

编程人员根据零件图，制订加工工艺（机床选择、刀具选择、夹具选择、刀具路径规划和数值计算以及切削用量确定等），编写加工程序。

操作人员将加工程序输入数控系统中，在进行了工件装夹、刀具调整及对刀等操作后，执行加工程序。

数控系统对加工程序进行数据处理后，输出控制信号控制机床各部分动作（如主轴起动、停止及主轴转速，刀具相对于工件的进给轨迹，自动换刀，切削液开、关等），进行自动切削加工。数控机床加工的基本特点有：

1）加工过程中无须人的过多介入，把人对加工精度的影响降低到最小。

2）数控机床本身机械精度和控制精度都较高，加工过程中的每一步严格按照加工程序来执行，保证了零件的加工精度以及精度保持的一致性。

3）数控机床自动化程度高，如自动换刀、自动对刀等，有效地缩短了非切削时间，加工效率高。

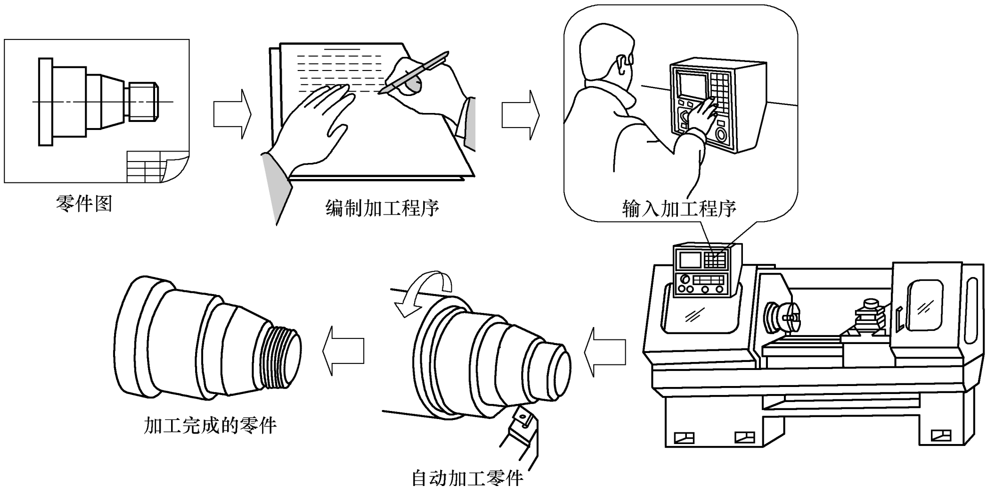
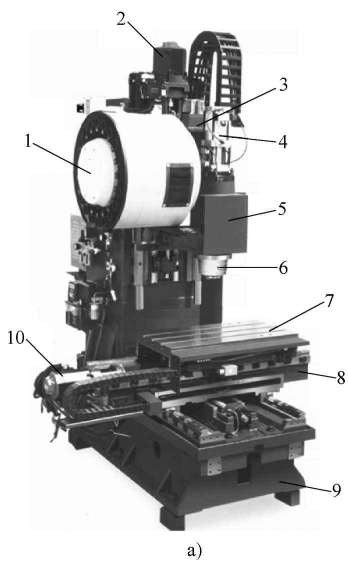


图 0-9　数控车床加工过程

4）采用标准化和模块化的刀具和夹具后，加工不同的零件只需更换相应的加工程序即可，适应性强。

0.3　数控机床的基本控制

尽管数控机床有各种类型，但机床的机械传动机构、电气控制以及基本数控指令有相通的地方。以图 0-3d 所示的立式加工中心为例，其机械结构和电气控制柜如图 0-10 所示。



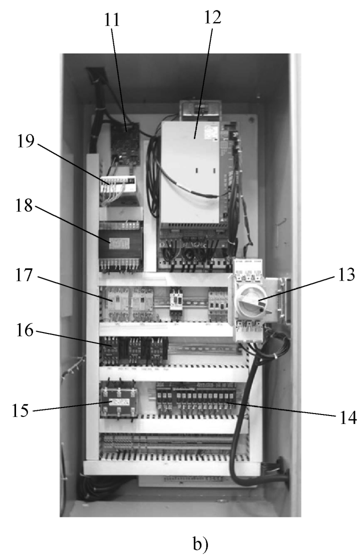


图 0-10　加工中心的机械结构和电气控制柜

a）机械结构　b）电气控制柜（位于机床后端）

1—回转式刀库　2—Z 轴伺服电动机　3—主轴电动机　4—松紧刀气缸　5—主轴箱　6—主轴

7—工作台　8—床鞍　9—床身　10—X 轴伺服电动机　11—I/O 模块　12—驱动器（主轴和伺服一体式驱动器）

13—电源开关　14—继电器　15—机床变压器　16—接触器　17—断路器　18—电源变压器　19—开关电源

数控机床的机械运动都是通过电气控制和驱动来实现的，包括主运动、进给运动和辅助功能的控制，如图 0-11 所示。

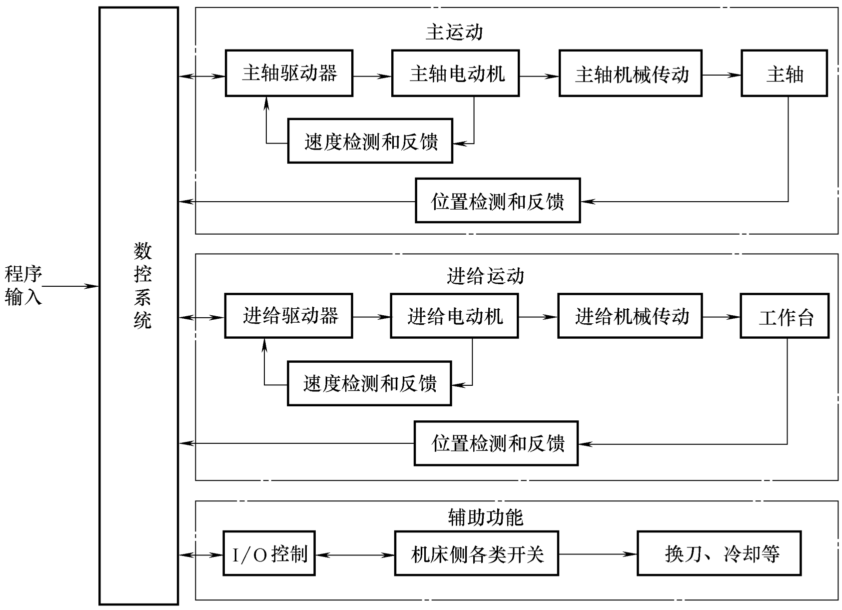


图 0-11　数控机床控制组成

1. 主运动的控制

主运动的机械传动包括主轴部件及传动，如带传动、齿轮传动等；主轴电气驱动包括主轴电动机和主轴驱动器等。数控系统对输入的 M03、M04、M05 和 S 指令进行数据处理后，输出控制信号给主轴驱动器，主轴驱动器即对主轴电动机实现起动、停止及调速等基本控制。

主轴控制的基本功能包括主轴正反转及主轴调速，对主轴进行控制，实际上就是对主轴电动机进行控制，即主轴电动机的正反转决定了主轴的转向；主轴电动机的转速决定了主轴的转速。主轴电动机的驱动是通过主轴驱动器来实现的。主轴控制的基本要求就是要保持主轴转速稳定，为此，在主轴电动机或主轴上安装有编码器来进行速度检测并反馈。

主轴控制的特殊功能包括主轴准停、定位控制、主轴齿轮在换档时的摆动控制、螺纹切削、刚性攻螺纹及同步控制等。为了保证位置控制的准确性，在主轴上安装编码器对主轴位置和速度进行检测并反馈。随着数控机床高速化的发展，有些数控机床的主轴采用了电主轴技术。

主轴控制涉及的机电技术包括主轴结构及主轴机械传动、主轴电动机及驱动，以及主轴速度和位置检测等。

2. 进给运动的控制

进给控制包括点位控制和轨迹控制（又称轮廓控制），如图 0-12 所示。

（1）点位控制　加工中心钻孔、扩孔、铰孔、攻螺纹及镗孔等均为点位控制。点位控制中，刀具从当前位置快速移动到下一位置的过程中不进行切削，移动路径可人为设置，但要保证点与点之间的位置精度。

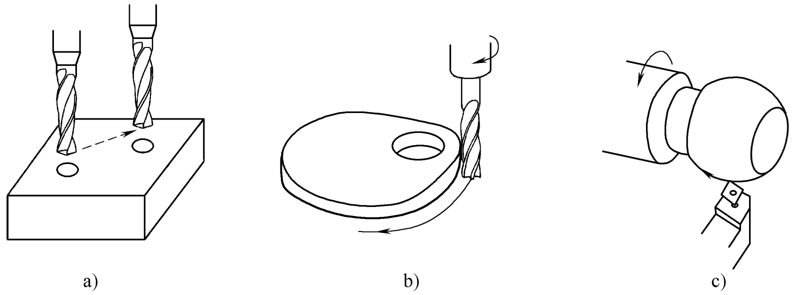


图 0-12　进给控制
a）点位控制　b）铣削轨迹控制　c）车削轨迹控制

（2）轨迹控制　数控铣床、加工中心、数控车床和数控磨床进行轮廓加工均为轨迹控制。轨迹控制中，刀具按规定的路径切削零件，既要保证位置精度，又要保证刀具运动速度的稳定。

进给运动的机械传动包括各运动轴的滚珠丝杠螺母副、导轨副等；进给电气驱动包括伺服电动机和伺服驱动器。数控系统对输入的 G01、G02、G03、G00 指令，坐标值和进给速度 F 指令进行处理后，输出控制信号给伺服驱动器，伺服驱动器输出电源给伺服电动机带动滚珠丝杠，使工作台实现进给运动，最终使刀具相对于工件按加工程序规定的运动轨迹和速度运动，实现切削加工。

数控系统对进给运动的控制核心是插补运算和位置控制。进给运动的控制目标是位置控制和速度控制，并保证位置控制的准确性、进给速度的稳定性和指令响应的快速性。为实现这一目标，数控机床的进给运动控制有位置检测和速度检测，如光栅和编码器。伺服系统中所采取的一切措施，如对机械传动进行预紧、反向间隙调整及补偿、丝杠螺距累积误差补偿，以及采用高精度的位置检测装置和伺服调整优化等，都是为了保证进给运动的稳定性和位置精度。随着数控机床高速化的发展，有些数控机床进给采用了直线电动机驱动，省去了滚珠丝杠，缩短了进给机械传动链，提高了机械传动刚度和精度，以及伺服系统的快速响应性。

进给运动控制涉及的机电技术，包括进给机械传动机构、伺服电动机及驱动、位置和速度检测装置、伺服系统性能及调整等。

3. 辅助功能的控制

数控机床基本的辅助功能包括切削液控制和润滑控制。数控车床中的刀架及换刀、液压尾座和液压卡盘，加工中心中的刀库选刀和换刀是最有特点的辅助功能。辅助功能由数控系统的 PLC 和外围控制电路完成。

0.4　数控技术的发展趋势

1. 高速化

速度、精度和效率是机械切削加工的关键性指标。高速切削加工不仅可以提高生产率，还可以改善加工质量。数控机床的高速化表现为：

1）数控系统能对微小程序段构成的加工程序进行高速处理，以计算出伺服电动机的旋转角度和速度，并要求伺服电动机能快速做出反应。

2）提高切削速度和进给速度，减少辅助时间。机床采用电主轴，最高转速可达 100000r/min 以上；采用直线电动机，在分辨力为 1μm 时，最大进给速度可达 200m/min；先进加工中心的刀具交换时间在 1s 以内。

2. 高精度化

先进的数控机床精度除了常规的静态几何精度外，还包括机床的运动精度、热变形，以及对振动的检测和补偿。数控机床的高精度化表现为：

1）数控系统采用高速插补技术以提高分辨率，采用高分辨率位置检测装置以提高位置检测精度；在位置伺服控制方面，采用前馈控制及非线性控制等方法以提高位置控制精度。

2）采用误差补偿技术。数控系统通过控制软件人为地产生一种新的误差去抵消当前的原始误差，以达到减小加工误差，提高零件加工精度的目的。除了反向间隙补偿、丝杠螺距累积误差补偿和刀具误差补偿等技术外，还可以对机床的热变形进行误差补偿。研究结果表明，综合补偿可减小 60%~80%的加工误差。

3. 高可靠性

数控系统可靠性的关键技术指标是平均无故障时间。数控系统的高可靠性表现为：

1）提高数控系统硬件的可靠性，并使硬件的功能软件化，以适应各种控制功能的要求。

2）数控系统通过运行起动诊断、在线诊断、离线诊断等多种诊断程序，对系统硬件、软件和各种外部设备进行故障诊断和报警，利用报警及时排除故障。

3）利用容错技术，对重要部件采用“冗余”设计，以实现故障自恢复。

4）利用各种测试、监控技术，当发生超程、刀损、干扰、断电等各种意外时，自动进行相应的保护。

4. 多轴联动和功能复合化

5 轴联动加工中心或数控铣床已经成为数控加工的热点。球头铣刀采用 5 轴联动控制加工自由曲面时，球头铣刀在切削过程中能始终保持合理的切削速度，从而显著改善加工表面的质量，并大幅度提高加工效率。随着数控技术的发展，数控系统的控制轴数也在不断增加，有的多达 16 轴，同时联动的轴数已达 6 轴。

复合机床是指在一台机床上实现从毛坯到成品的多种要素加工，如由铣镗钻复合而成的加工中心，由车铣复合而成的车削中心，以及由铣镗钻车复合而成的复合加工中心等。采用复合机床进行加工，减少了工件装夹定位的次数和误差、更换和调整刀具的辅助时间，提高了零件加工精度，缩短了产品制造周期，提高了生产率和企业市场反应能力，相对于传统的加工工序和分散的生产方式具有明显的优势。

5. 工业机器人在数控加工生产线中的应用

在汽车零件（如轴、盘、盖等）加工领域，存在零件批量大、零件复杂且加工工位多的特点，需要多台数控机床协同加工。传统加工过程中，工件的装卸、搬运均需要人工完成，存在生产率低的问题。将数控机床与工业机器人整合起来，组成数控加工生产线，具有自动化程度高、生产节拍短、高柔性的特点。在数控加工生产线中，工业机器人主要用于零件在各数控机床间的搬运和装卸，有桁架式、导轨移动式和固定回转式等类型。

6. 智能化

数控系统智能化的意义在于，通过人机界面的可视化大幅提升工作效率，确保工作更加舒适和安全。智能化表现为：

1）加工过程自适应控制技术。通过检测加工过程中的切削力、主轴和伺服电动机的功率、电流和电压等信息，辨识出刀具的受力、磨损及机床稳定性等状态，并根据这些状态实时调整主轴转速、进给速度，使机床处于最佳运行状态，以提高加工精度、降低加工表面的表面粗糙度值，并提高机床运行的安全性。

2）工艺专家系统。将专家经验、切削加工的一般规律和特殊规律存入计算机中，以加工工艺参数数据库为支撑，建立具有人工智能的专家系统，提供经过优化的切削参数，使机床始终处于最优和最经济的切削状态，从而提高编程效率和加工工艺水平、缩短生产准备时间。

3）智能化主轴和伺服驱动技术。能自动识别电动机及负载的转动惯量，并自动对主轴和伺服系统参数进行优化，使驱动系统获得最佳运行状态。

4）智能故障诊断技术。能够完整地记录系统的各种信息，通过专家知识库对故障进行推理，找出故障的原因并给出解决问题的方法。同时，计算机通过对故障诊断的深度学习，不断更新专家知识库。

7. 网络化

数控系统网络化是指数控系统与外部的其他控制系统或上位计算机进行网络通信。数控系统网络化后，使数控机床具有双向、高速联网的通信功能，以保证信息流在车间各部门间畅通无阻，既可以实现资源共享，又能实现数控机床的远程监视、控制和管理等，还可以实现数控机床的数字化服务，如数控机床故障的远程诊断和维护等。

8. 绿色化

机床在切削加工过程中不仅消耗能源，还会产生固体、液体和气体废弃物，对工作环境和自然环境造成直接或间接的污染。绿色化包括：

1）机床在保证刚度的前提下，采用新结构和新材料以实现轻量化，从而降低运动部件的功率损耗。

2）采用干切削，不使用切削液，以减少污染排放。

3）采用先进刀具，选择合理的刀具几何角度和切削参数，有效提升切削加工效率，降低切削过程中所需的功率，延长刀具寿命，从而达到以较少的资源消耗获得较大产出的目的。

0.5 本课程的任务和学习方法

本课程的任务是：在阐明数控机床各组成部分基本原理的基础上，使读者逐一了解主轴运动、进给运动及各种辅助运动的机械传动和电气控制实现的方法，掌握机电配合有关参数的设计和系统调试，并将此理念应用到其他机电一体化设备中。本书对数控机床加工程序的编制也给予了介绍，并结合了较多的实例，以使读者能解决工作现场的实际问题。

本课程涉及的学科面广，需要有广泛的专业基础和理论知识。学好本课程的关键在于理

论联系实际，要重视试验，善于借鉴，从整体上把握数控机床的运行原理和控制过程，以及加工程序的基本指令和程序编制的方法。

思考题与习题

1. 机床数控技术是指什么？
2. 常见数控机床有哪些类型？
3. 数控机床主轴和进给控制涉及哪些机电技术？
4. 对数控机床辅助功能有哪些基本控制？
5. 点位控制和轮廓控制有什么特点？
6. 数控机床的高速化和高精度体现在哪些方面？

第 1 章



数控机床机械传动

数控机床机械传动包括进给机械传动、主轴机械传动和辅助装置。进给机械传动的主要特征是滚珠丝杠螺母副和导轨副，进给机械传动的性能是数控机床精度及运动稳定性的重要保证；主轴机械传动包括主轴部件和传动带、齿轮等传动方式；辅助装置包括换刀装置、定位夹紧装置及回转工作台等。

1.1　进给机械传动

1.1.1　滚珠丝杠螺母副

1. 作用

滚珠丝杠螺母副是数控机床进给机械传动的重要部件，是一种将旋转运动转换成直线运动的传动部件。图 1-1 所示为滚珠丝杠螺母副在数控机床进给传动中的应用。

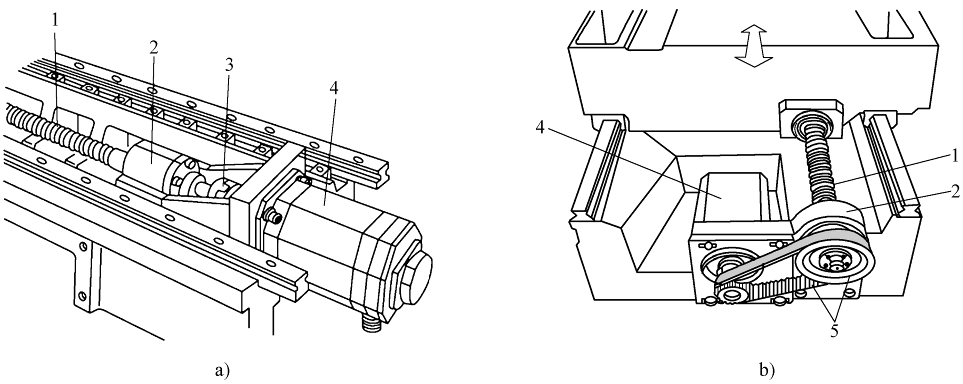


图 1-1　滚珠丝杠螺母副在数控机床进给传动中的应用

a）滚珠丝杠与伺服电动机直连　b）滚珠丝杠通过同步带与伺服电动机连接

1—丝杠　2—轴承座　3—联轴器　4—伺服电动机　5—同步齿形带及带轮

滚珠丝杠一端通过联轴器或同步带轮和同步带与伺服电动机连接，随伺服电动机转动；丝杠螺母与工作台等移动部件连接，丝杠转动时，工作台随丝杠螺母沿导轨做直线运动。伺服电动机的转速决定了工作台的进给速度，伺服电动机转动的角度决定了工作台移动的距离，伺服电动机的正、反转决定了工作台的进给方向。

2. 滚珠丝杠螺母副的特点

（1）循环方式　滚珠丝杠螺母副由丝杠、螺母及滚珠组成，丝杠外表面和螺母内表面上有截面为弧形的螺旋滚道，丝杠转动时，滚珠在螺母中循环滚动。滚珠在螺母中的循环有内循环和外循环两种形式，如图 1-2 所示。

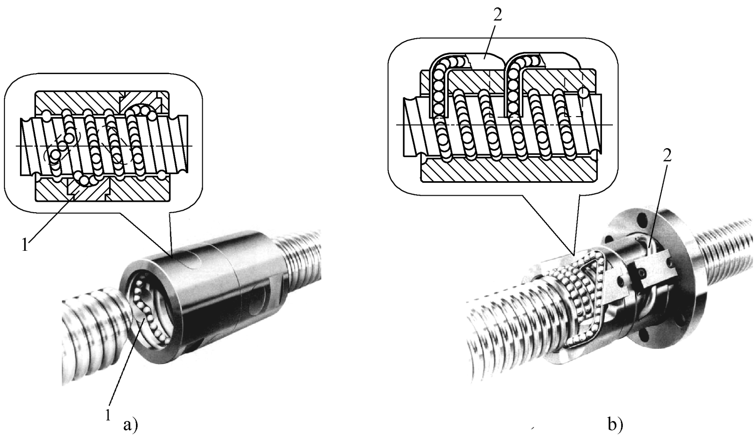


图 1-2　滚珠循环方式

a）内循环　b）外循环

1—反向器　2—导向管

内循环方式中，滚珠通过设置在螺母内的反向器变换滚道，以达到循环的目的；外循环中，滚珠通过螺母上的导向管变换滚道，以达到循环的目的。

（2）丝杠螺距及累积误差　将丝杠上的滚道等效成螺旋线，则丝杠转一圈（360°），丝杠螺母移动的直线距离称为螺距，如图 1-3 所示。丝杠有不同的精度等级，在丝杠全程上，每个螺距有不同程度的误差，随着丝杠的转动，螺母连续直线运动，其直线位移是螺距的累积，同时，螺距误差随着直线位移的增加也在累积，从而造成丝杠螺距累积误差。丝杠螺距累积误差是影响数控机床坐标轴定位误差的主要因素。

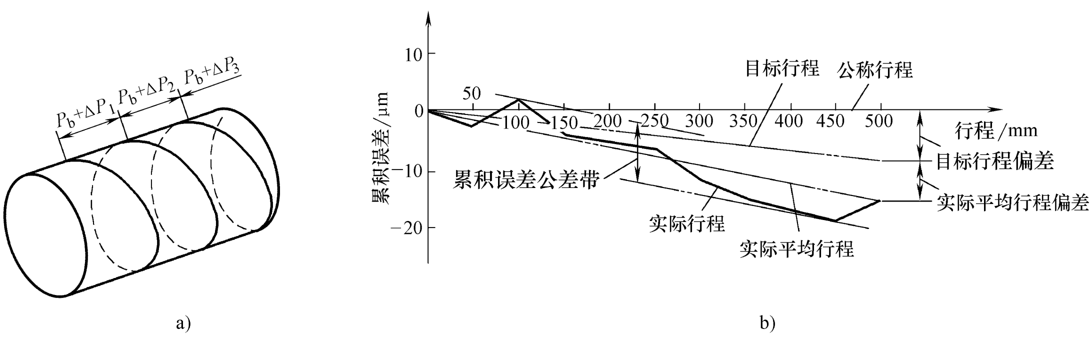


图 1-3　丝杠螺距及累积误差

a）丝杠螺距　b）丝杠螺距累积误差曲线

图 1-3a 中，P_b 为丝杠公称螺距，ΔP 为各螺距的误差，考虑到丝杠预紧及热变形等因素使丝杠产生伸缩的影响，预先将公称螺距做得小一些，此螺距称为目标螺距。图 1-3b 所

示为丝杠螺距累积误差曲线。其中，公称行程=公称螺距×丝杠螺纹圈数，目标行程=目标螺距×丝杠螺纹圈数；实际平均行程轨迹是用最小二乘法拟合实际行程的直线。目标行程偏差是目标行程相对于公称行程在最远端的累积误差之差，本例为 9μm/500mm；实际平均行程偏差是实际平均行程与目标行程之差，本例为 7μm；累积误差公差带是最大实际平均行程与最小实际平均行程累积误差之差，本例为 8. 8μm。

（3）定位误差测量　在现代数控系统中：一方面，通过激光干涉仪等精密测量仪器对数控机床移动轴的定位误差进行测量；另一方面，数控系统有螺距累积误差补偿功能，通过对测量所得的定位误差进行软件补偿，减小丝杠累积误差对数控机床定位精度的影响，提高位置控制精度。激光干涉仪是一种自动化、高精度的定位误差测量仪器，通过运行测量程序，对被测轴的实际位移进行测量，经软件处理可快速获得定位误差曲线及位置精度数据。图 1-4 所示为激光干涉仪定位误差测量示意图。

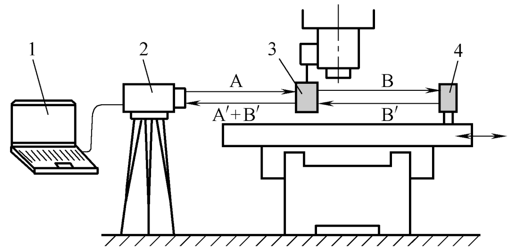


图 1-4　激光干涉仪定位误差测量示意图
1—安装有测量软件的计算机　2—激光器
3—干涉镜　4—反光镜

干涉镜固定在主轴端，并保持主轴位置固定，激光器与干涉镜的距离固定，反射镜固定在工作台上，随工作台移动。激光器发射光 A 经干涉镜中的半反半透镜和反光镜后分为两路，一路为反射光 A′，另一路为透射光 B。透射光 B 经工作台上的反射镜产生反射光 B′，由于工作台的移动，造成反射光 B′路程的变化，则 A′光和 B′光在干涉镜处产生光的干涉现象，产生明暗相间的条纹，激光器内部处理电路对条纹进行计数，从而获得工作台实际移动的距离，测量精度可达 0. 1μm。激光干涉仪通过数据线与计算机连接，通过运行测量软件，获得定位误差曲线及位置误差数据。

定位误差测量就是在空载状态下，对被测进给轴视机床规格分为 20mm、50mm 或 100mm 等间距，在全行程内正向和反向快速移动定位，在每个位置上测出实际指令位置值与实际位置值之差，经多次测量和数据统计处理，获得定位误差曲线。

3. 丝杠螺母预紧

丝杠、滚珠和螺母之间存在轴向间隙，当丝杠转向瞬间改变时，螺母并不瞬间改变移动方向，而是在克服轴向间隙后再移动，从而产生了位置误差，该轴向间隙又称为反向间隙。为避免反向间隙的影响，可采用丝杠螺母预紧的方式，如图 1-5 所示。

在图 1-5a 中，调整垫片厚度，可调节两个螺母间的预紧量。双螺母预紧除了垫片调整外，还有螺母调整和齿差调整等方法；在图 1-5b 中，螺母中间两侧的螺距有相对偏移量，该偏移量即为预紧量。丝杠螺母预紧除了克服反向间隙外，还能提高丝杠螺母的传动刚度，增强传动的稳定性。

反向间隙除了用机械调整手段外，现代数控系统还有反向间隙补偿功能，通过软件补偿，消除反向间隙对位置精度的影响。

4. 丝杠支承及预紧

为适应不同的使用场合，丝杠支承有各种方式，如图 1-6 所示。

（1）一端固定、一端自由　固定端采用成对角接触轴承，以承受正、反向的轴向载荷，

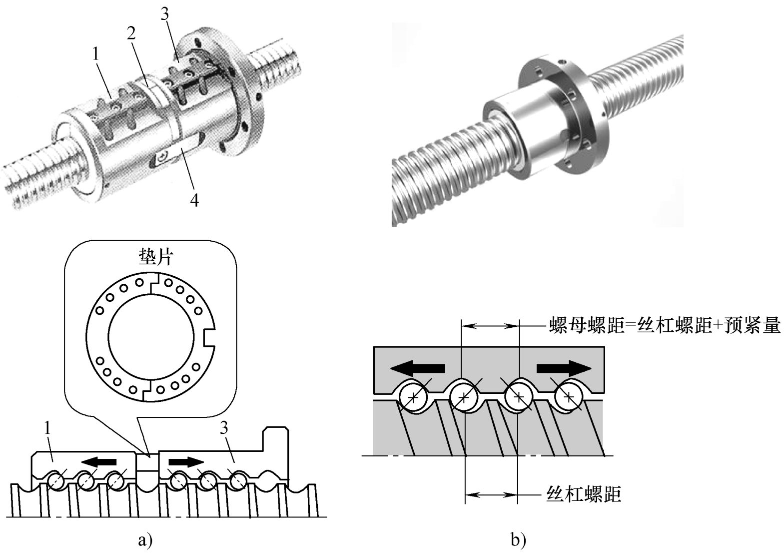


图 1-5　丝杠螺母预紧

a）双螺母垫片预紧　b）单螺母错位预紧

1—丝杠螺母 A　2—垫片　3—丝杠螺母 B　4—压紧键

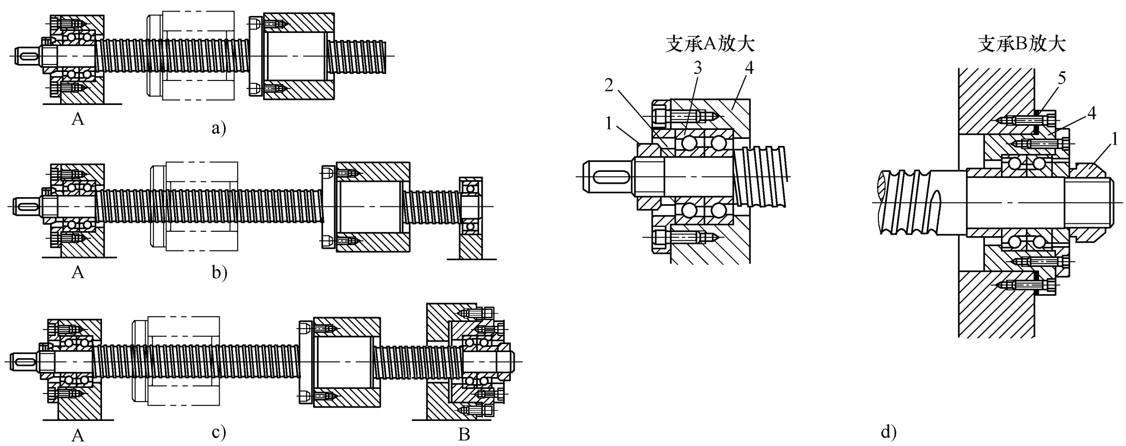


图 1-6　丝杠支承

a）一端固定、一端自由　b）一端固定、一端游动　c）两端固定　d）支承 A、B 放大

1—圆螺母　2—套筒　3—角接触球轴承　4—轴承座　5—调整垫片

自由端无轴承支承（图 1-6a）。这种支承方式的丝杠容易弯曲变形，轴向刚度低，适用于短丝杠，常用于数控车床 *X* 轴丝杠支承。

（2）一端固定、一端游动　固定端采用成对角接触轴承，游动端采用深沟球轴承（图 1-6b）。当丝杠受热伸长时，游动端轴承沿轴向可移动，以消除丝杠受热引起的弯曲变形。大多数一般精度的中小型数控机床常采用这种支承方式。

（3）两端固定　丝杠两端均采用成对角接触轴承，其中一固定端轴承座可轴向调整（图 1-6c）。两端固定的丝杠支承方式适用于高精度进给机械传动。

在所示的支承 A 结构中，通过调整圆螺母使轴承轴向预紧，消除轴承的轴向间隙，提高传动刚度；在所示的支承 B 结构中，通过调整轴承座的垫片厚度对丝杠进行预紧，使其在轴向产生微伸长量。丝杠预紧一方面能提高滚珠丝杠螺母副的拉压刚度，有利于提高进给传动的定位精度，抵消丝杠传动时的热变形；另一方面还影响滚珠丝杠螺母副轴向拉压振动的固有频率，提高进给机械传动的稳定性。拉压刚度由丝杠本身的拉压刚度、丝杠副内滚珠与滚道的接触刚度和支承轴承的接触刚度等组成。

5. 垂直轴防下滑与平衡

滚珠丝杠垂直安装（如立式或卧式数控铣床主轴箱的上下运动）或倾斜安装（如斜床身数控车床的 X 轴）时，由于滚珠丝杠无自锁的特性，为防止伺服电动机断电时主轴箱因无保持转矩而出现下滑的现象，与垂直丝杠连接的伺服电动机中有电磁制动器（电磁抱闸），如图 1-7 所示。

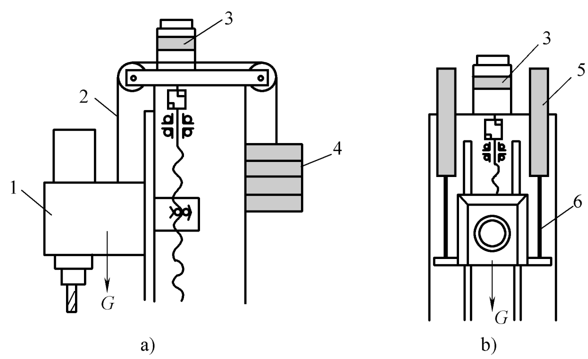


图 1-7　垂直轴防下滑

a）平衡块平衡　b）液压平衡

1—主轴箱　2—链条　3—伺服电动机中的电磁抱闸

4—平衡块　5—液压缸　6—活塞杆

电磁抱闸得电松开，伺服电动机可带动滚珠丝杠旋转；伺服电动机断电时，电磁抱闸失电，锁住伺服电动机转子，从而锁住垂直丝杠，防止主轴箱下滑。另外，为了平衡主轴箱的重力，垂直轴上有平衡装置。图 1-7a 所示为平衡块平衡方式，平衡块通过链条与主轴箱相连，随主轴箱的上下而同步运动；图 1-7b 所示为液压平衡方式，液压缸固定在立柱上，活塞杆与主轴箱连接，主轴箱上下运动时，液压缸平衡压力由液压系统自动调节。

1.1.2　导轨

导轨是数控机床进给传动机构的重要部件之一，对工作台等移动部件起支承和导向作用。数控机床常用的导轨有滑动导轨和滚动导轨等。

1. 滑动导轨

数控机床滑动导轨通常采用矩形-矩形、三角形-矩形组合形式，如图 1-8 所示。

导轨侧面有宽式导向和窄式导向两种导向方式，宽式导向以两根导轨的内侧面或外侧面进行导向；窄式导向以一根导轨的两侧面进行导向，如图 1-8a 中 A、B 所示。在三角形-矩形导轨组合中，以三角形导轨作为主要导向面，侧向间隙能自动补偿，无须镶条调整，如图 1-8b 所示。矩形-矩形导轨组合需要用压板和镶条来进行调整。其中：压板用来调整导轨支承面的间隙，保证导轨在垂直面内的直线移动精度，并承受颠覆力矩；镶条用来调整矩形导轨的侧向间隙并预紧，保证导轨在水平面内直线移动精度。压板和镶条的形式如图 1-9 所示。

压板用螺钉固定在动导轨上，在修磨刮研方式中，通过修磨压板的 A 面或 B 面来调整压板与静导轨之间的间隙并预紧；在镶条和垫片方式中，分别通过调节螺钉或修磨垫片厚度来调整压板与静导轨之间的间隙并预紧。

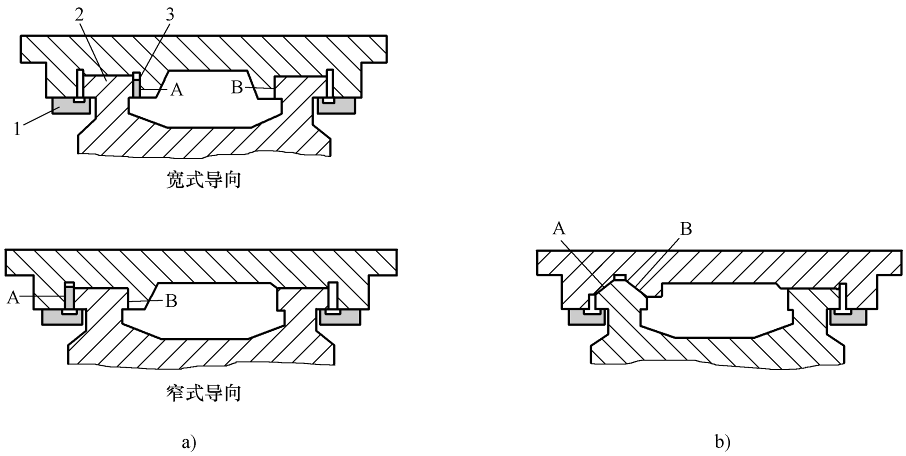


图 1-8　滑动导轨

a）矩形-矩形组合　b）三角形-矩形组合

1—压板　2—导轨　3—镶条

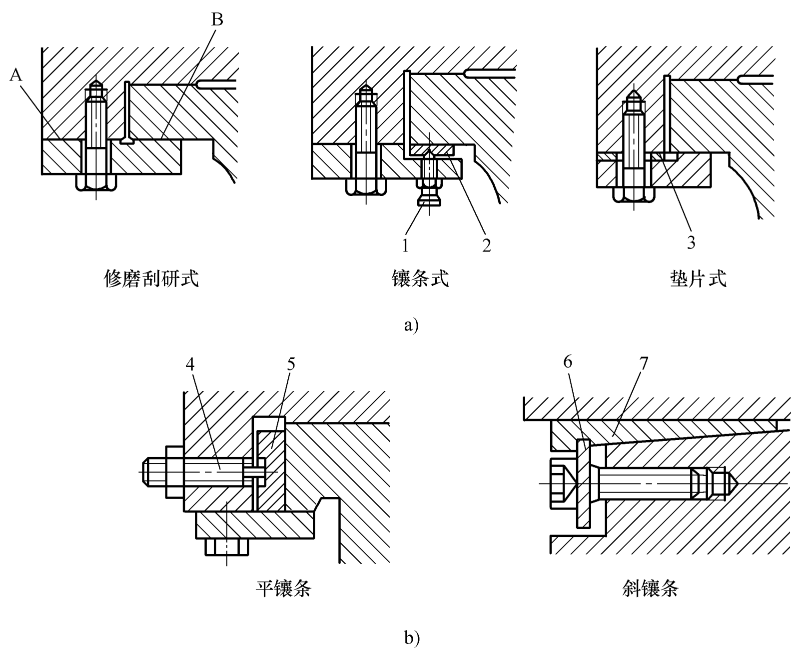


图 1-9　压板和镶条

a）压板　b）镶条

1、4—调节螺钉　2—压板镶条　3—垫片　5—平镶条　6—拨动体　7—斜镶条

镶条通常放在导轨侧面。平镶条全长厚度相等且横截面为矩形或平行四边形，通过调节螺钉使平镶条产生横向位移来调整间隙并预紧，由于螺钉各着力点的预紧力不均匀，镶条会产生挠曲；斜镶条全长厚度发生变化，通过调节拨动体使斜镶条产生纵向位移，以此来调整间隙，并使导轨在全长上预紧且受力均匀。由于斜镶条楔形的增压作用会产生较大的横向预

紧压力，造成负载增大，调整时应注意。

由于摩擦特性的原因，金属对金属的滑动导轨存在低速爬行的现象，为了改善摩擦特性，提高耐磨性及定位精度，数控机床滑动导轨常采用塑料导轨。塑料导轨是一种由高分子材料制成的薄板（也称抗磨软带），用粘结剂粘贴在打磨后的金属导轨面上。图 1-10 所示为塑料导轨结构示意图。

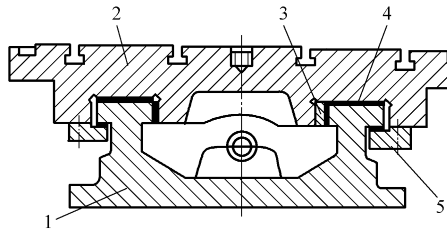


图 1-10　塑料导轨结构示意图

1—床身　2—工作台　3—镶条　4—导轨软带　5—压板

塑料导轨具有高耐磨、低摩擦（如铸铁-聚四氟乙烯的摩擦因数为 0.06）、无爬行等特点。

2. 滚动导轨

滚动导轨由专业工厂生产，形成标准化系列产品。滚动导轨由导轨和滑块组成，导轨固定在机床床身上，滑块固定在工作台等移动部件上。滑块内有循环的滚动体，如图 1-11a 所示。滑块与导轨之间为滚动摩擦，摩擦阻力小，无爬行现象，长时间使用后精度损失小。

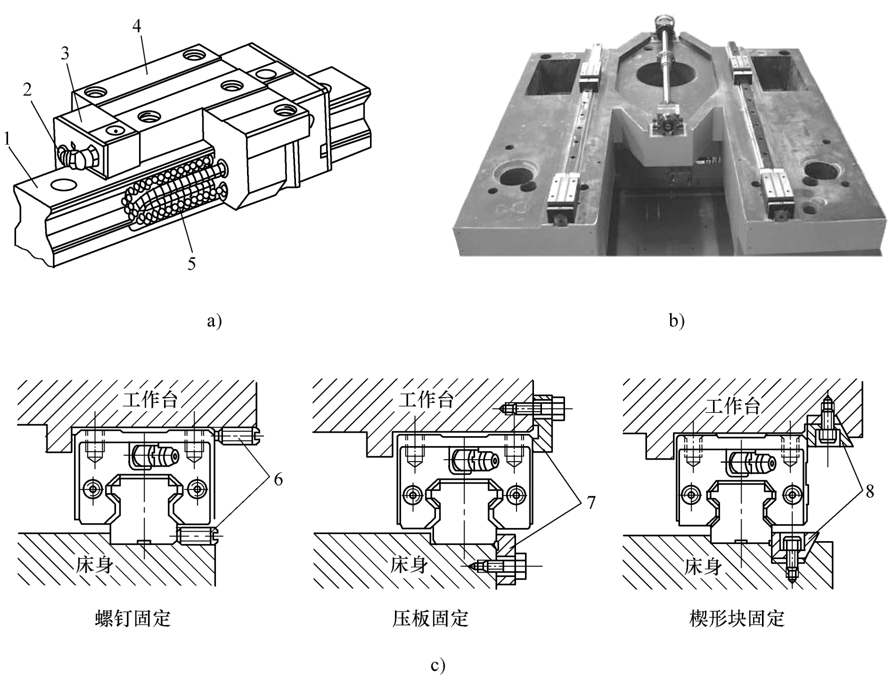


图 1-11　滚动导轨

a）组成　b）导轨安装位置　c）导轨和滑块侧向定位固定方式

1—导轨　2—油嘴　3—端盖　4—滑块　5—滚动体　6—螺钉　7—压板　8—楔形块

当滑块与导轨做相对运动时，滚动体在滑块内部通过反向器不断循环滚动，并沿着导轨滚道做滚动运动。滑块中滚动体采用脂润滑或通过油嘴进行油润滑，反向器两端装有防尘密

封端盖，可有效防止灰尘进入滑块中。

当滚动体为滚珠时，摩擦因数为 0.002~0.003，滚动导轨的灵敏度和定位精度较高，但承载能力和刚度较小，一般需要通过预紧来提高。滚珠滚动导轨适用于运动部件质量不大，且切削力较小的数控机床。当滚动体为滚柱时，摩擦因数为 0.005~0.01，滚动导轨的承载能力及刚度较高，但对安装有较高的要求，以避免因偏移而造成导轨磨损，降低精度。滚柱滚动导轨适用于载荷较大的数控机床。

导轨安装位置如图 1-11b 所示，导轨和滑块侧向定位固定方式如图 1-11c 所示。用螺钉固定调整方便，但有可能使每个紧固点的受力不均匀；用压板固定时，通过调整螺钉使压板对导轨和滑块侧面施加一定的预紧力；用楔形块固定时，通过调整螺钉使楔形块侧向对导轨和滑块施加预紧力。压板或楔形块固定时，导轨和滑块的侧面需要稍微超出安装基准面的边缘，以便压板或楔形块能压紧导轨和滑块。

3. 滚动导轨块

滚动导轨块是一种标准组件，如图 1-12a、b 所示，导轨块中的滚动体为滚柱或滚针，有单列和双列两种排列方式，导轨块沿导轨做直线运动时，滚动体在本体上做循环滚动。

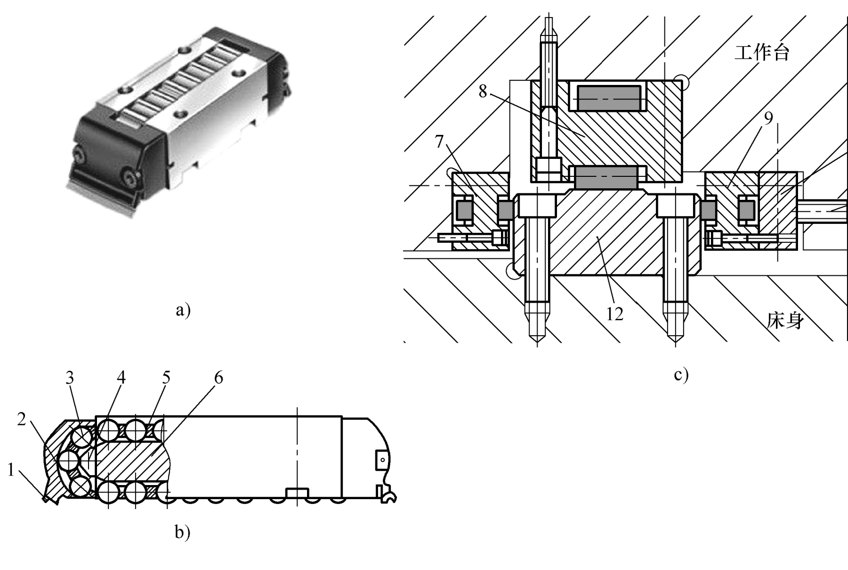


图 1-12　滚动导轨块

a）外观　b）结构组成　c）单列滚动导轨块安装示意图

1—防护板　2—盖板　3—滚柱　4—导向片　5—保持器　6—本体

7、8、9—滚动导轨块　10—镶条　11—调节螺钉　12—导轨

在图 1-12c 所示的单列滚动导轨块安装示意图中，滚动导轨块 8 通过安装螺钉与工作台连接，承受工作台等载荷的作用，滚动导轨块 7、9 也通过安装螺钉在侧向与工作台连接，起导向作用，并通过镶条 10 进行侧向间隙调整和预紧。滚动导轨块具有安装方便、润滑简单及调整容易的特点。

1.2　主轴机械传动

1.2.1　数控机床主轴传动方式

1. 带传动

带传动示意图如图 1-13 所示。

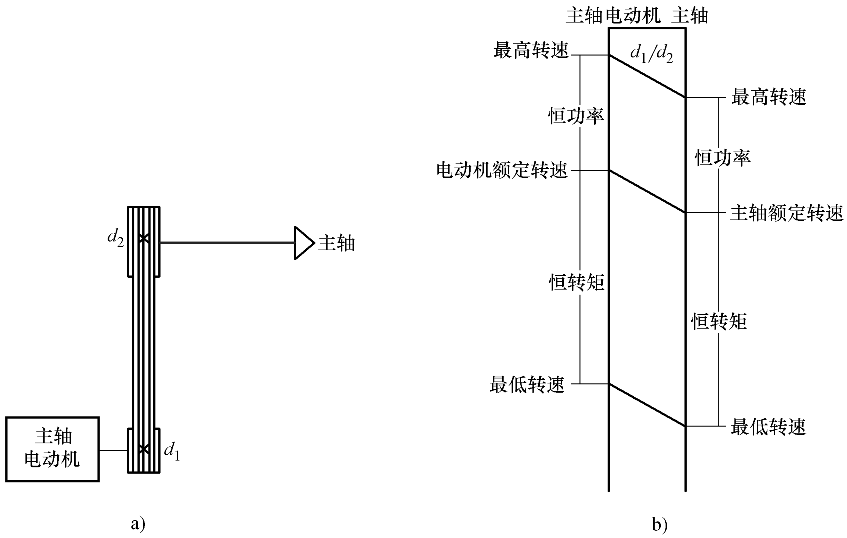


图 1-13　带传动

a）传动简图　b）主轴变速范围

在主轴电动机采用变频专用三相交流异步电动机及矢量变频调速的情况下，因为主轴电动机有很宽的恒转矩和恒功率调速范围，所以主轴电动机可以通过传动带与主轴连接，通过对主轴电动机的控制实现对主轴转速和转向的控制，简化了主轴传动机构。在恒转矩调速段，主轴功率随主轴转速升高正比增大，在恒功率调速段，主轴转矩随主轴转速升高反比下降。带传动多用于数控车床和中、小型加工中心的主轴传动。

2. 齿轮换档传动

在主轴电动机采用普通三相交流异步电动机及变频调速的情况下，为了获得主轴低速大转矩，并扩大恒功率调速范围，有些数控机床主轴采用齿轮换档变速。齿轮换档机构有液压拨叉和电磁离合器两种形式。图 1-14 所示为主轴齿轮液压换档变速示意图。

在图 1-14a 中，主轴齿轮采用液压缸和拨叉进行高、低两档切换。高速档（图 1-14a所示位置）时，电磁换向阀动作，液压缸活塞伸出，通过拨叉使滑移齿轮移动，z_1 和 z_2 啮合，z_3 和 z_4 脱开，高速档到位检测开关 SQ1 发出信号，传动路径：主轴电动机→传动带 d_1/d_2→ Ⅰ 轴→z_1/z_2→主轴；低速档时，电磁换向阀动作，液压缸活塞缩

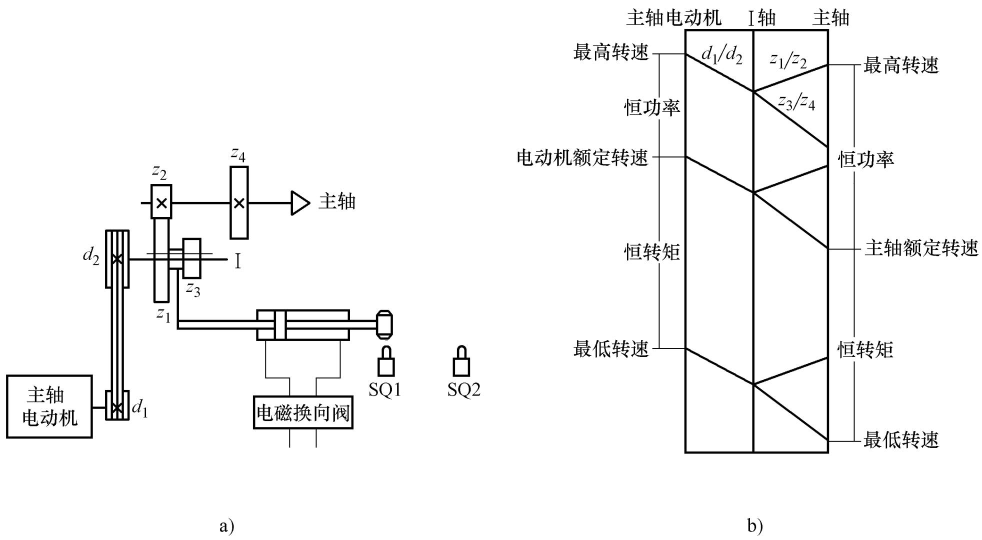


图 1-14　主轴齿轮液压换档变速
a）传动简图　b）主轴变速范围

回，通过拨叉使滑移齿轮移动，z_3 和 z_4 啮合，z_1 和 z_2 脱开，低速档到位检测开关 SQ2 发出信号，传动路径：主轴电动机→传动带 d_1/d_2→ I 轴→z_3/z_4→主轴。齿轮换档有手动和自动（M 指令）两种操作方式，电磁换向阀的动作及换档到位检测由数控系统的 PLC 进行控制。另外，为避免齿轮换档啮合时产生顶齿现象，要求主轴电动机有短时正、反转的摆动控制。

3. 主轴直接驱动

在高速、高精度数控机床上，为了使主轴达到每分钟数万转的高转速，主轴和电动机间不再通过齿轮、同步带等机械传动装置进行连接，而是主轴电动机通过联轴器与主轴连接，直接对主轴进行驱动，如图 1-15 所示。

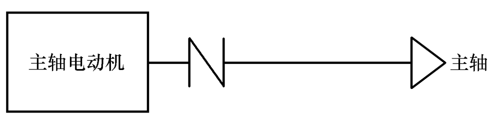


图 1-15　主轴直接驱动

随着主轴电动机技术的发展，在高速主轴领域也有采用电主轴的方案。电主轴是一种将主轴与电动机转子集成在一起的电动机，简化了主轴传动机构。

1.2.2　数控车床主轴

1. 主轴部件

图 1-16 所示为数控车床主轴的部件及内部结构。

在图 1-16b 所示的数控车床主轴内部结构中，主轴前支承采用三个超精密级角接触球轴承组合方式，后支承采用两个角接触球轴承，轴承采用隔套和圆螺母进行轴向间隙调整和预紧；主轴后端安装带轮，通过传动带与主轴电动机连接。

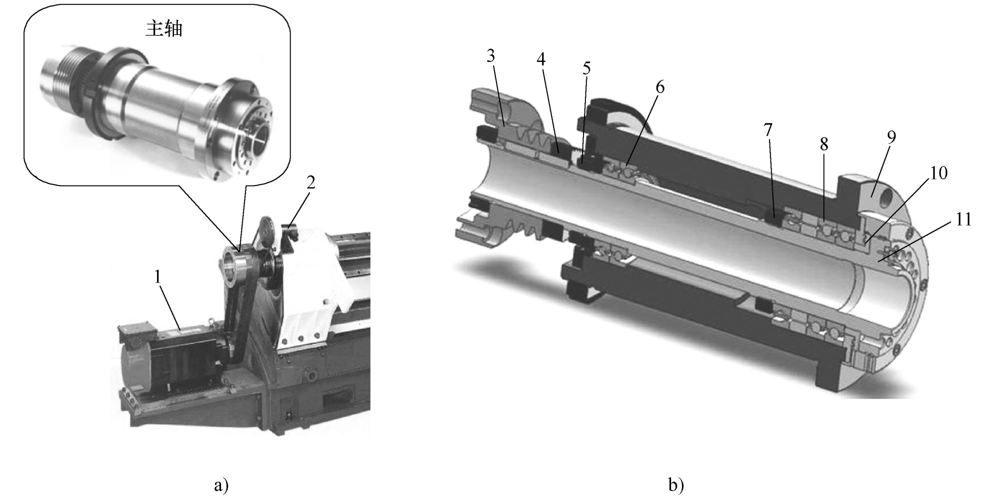


图 1-16　数控车床主轴的部件及内部结构

a）部件　b）内部结构

1—主轴电动机　2—主轴编码器　3—带轮　4—编码器同步带轮　5—后轴承圆螺母

6—后端角接触球轴承　7—前端轴承圆螺母　8—后端角接触球轴承组　9—法兰　10—密封圈　11—主轴

2. 主轴辅助装置

（1）主轴编码器　数控车床主轴的一个重要特征就是，在主轴上安装有编码器（称为主轴编码器），主轴与编码器之间通过 1∶1 的同步带连接。主轴编码器用于检测主轴的实际转速和角位移。

（2）主轴液压卡盘　有些数控车床主轴可选装液压卡盘，以进一步提高加工的自动化程度和加工效率，如图 1-17 所示。

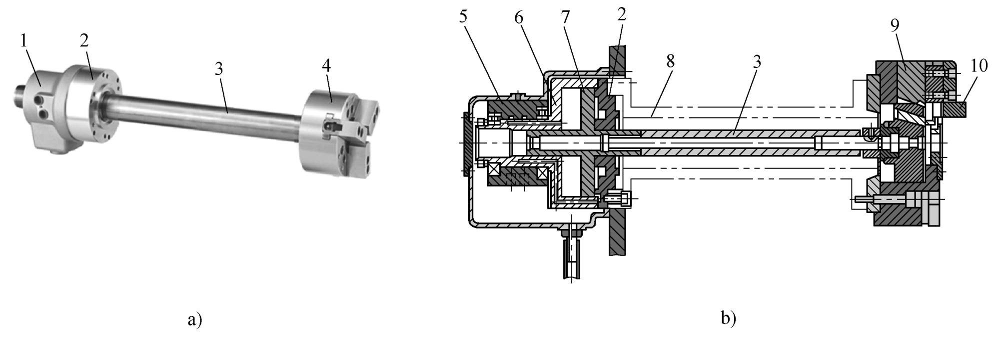


图 1-17　主轴液压卡盘

a）组成　b）结构

1—卡盘液压缸　2—连接盘　3—拉杆　4—卡盘　5—固定液压缸　6—回转液压缸

7—活塞　8—主轴　9—滑座　10—卡爪

主轴液压卡盘是一套组件，由卡盘液压缸、拉杆和卡爪组成。主轴液压卡盘安装在主轴前端，通过拉杆与主轴后端的卡盘液压缸活塞连接，卡盘液压缸由固定液压缸和回转液压缸组成，回转液压缸通过连接盘与主轴后端连接，随主轴一起转动，卡盘的夹紧与松开由活塞通过拉杆来带动。图 1-18 所示为主轴液压卡盘的液压系统。

主轴液压卡盘有高压夹紧和低压夹紧两种状态。图 1-18中，减压阀 1 调定压力为高压，减压阀 2 调定压力为低压，电磁阀 3 用于高压和低压切换，电磁阀 4 用于夹紧和松开切换。主轴液压卡盘的夹紧和松开由数控系统的 PLC 控制。

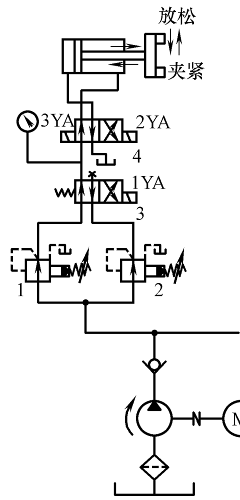


图 1-18　主轴液压卡盘的液压系统
1、2—减压阀　3、4—电磁阀

1.2.3　数控铣床及加工中心主轴

图 1-19 所示为立式加工中心主轴。

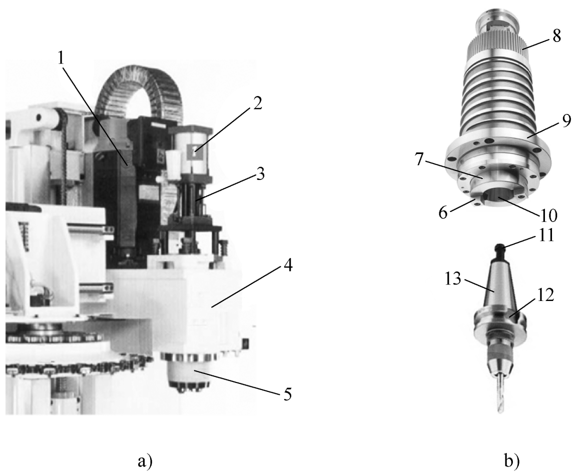


图 1-19　立式加工中心主轴
a）主轴传动组成　b）主轴部件和刀柄
1—主轴电动机　2—松紧刀气缸（打刀气缸）　3—增压液压缸　4—主轴箱　5—主轴部件　6—主轴端面键　7—主轴　8—带轮　9—法兰　10—主轴 7∶24 锥孔　11—拉钉　12—刀柄键槽　13—7∶24 锥柄

加工中心主轴部件和主轴电动机均安装在主轴箱上，主轴电动机通过传动带带动主轴。主轴采用 7∶24 锥孔，与 7∶24 锥柄配合；刀柄上的键槽与主轴端面键配合，实现周向定位；刀柄后端上的拉钉与主轴中的弹性卡爪配合，实现刀柄的夹紧或松开。加工中心为了实现自动换刀功能，其主轴最明显的特征就是具有松紧刀功能。图 1-20 所示为加工中心主轴内部结构。

主轴通孔中有拉杆组件，由拉杆 9、碟形弹簧 6 和弹性卡爪 5 组成。松刀时，气缸上腔进气，气缸活塞下移，并通过增压液压缸使液压缸活塞下移，液压缸活塞上的通孔螺钉 10

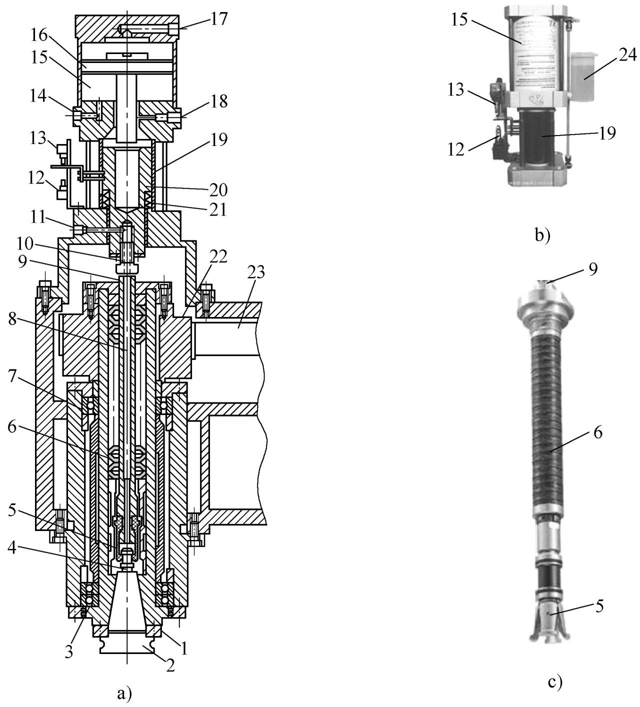


图 1-20　主轴部件内部结构及组成

a）内部结构　b）松紧刀气缸　c）拉杆组件

1—主轴端键　2—刀柄　3—前端轴承　4—拉钉　5—弹性卡爪　6—碟形弹簧　7—后端轴承

8—喷气孔　9—拉杆　10—通孔螺钉　11—主轴吹气孔　12—刀具松开检测开关

13—刀具夹紧检测开关　14—气缸气孔 A　15—气缸　16—气缸活塞　17—气缸气孔 B

18—液压缸加油孔（接油杯）19—增压液压缸　20—液压缸活塞

21—复位弹簧　22—主轴带轮　23—同步带　24—油杯

推动拉杆 9 向下移动，同时，碟形弹簧 6 被压缩；当弹性卡爪 5 随拉杆 9 向下移动一段距离后，卡爪在弹力的作用下自动松开拉钉 4；当刀具松开检测开关接通后，机械手就可以将刀具取出进行换刀；与此同时，压缩空气从主轴吹气孔进入，通过通孔螺钉 10 和拉杆通孔吹向主轴锥孔表面，吹掉主轴锥孔内的脏物。当新刀柄装入主轴锥孔后，气缸下腔进气，气缸活塞和液压缸活塞复位；拉杆 9 在碟形弹簧 6 的作用下复位，弹性卡爪 5 随拉杆 9 复位，并将刀柄上的拉钉 4 夹紧；当刀具夹紧检测开关接通时，完成刀柄夹紧控制。图 1-21 所示为主轴松紧刀气动控制回路。

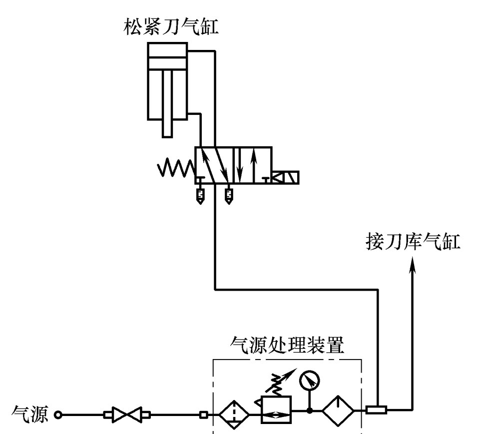


图 1-21　主轴松紧刀气动控制回路

松紧刀气缸由二位五通单电控电磁阀控制。

松刀时，电磁阀线圈得电，压缩空气进入气缸上腔；紧刀时，电磁阀线圈失电，电磁阀复位，压缩空气进入气缸下腔。气源处理装置对气源进行过滤、调压和油雾处理。

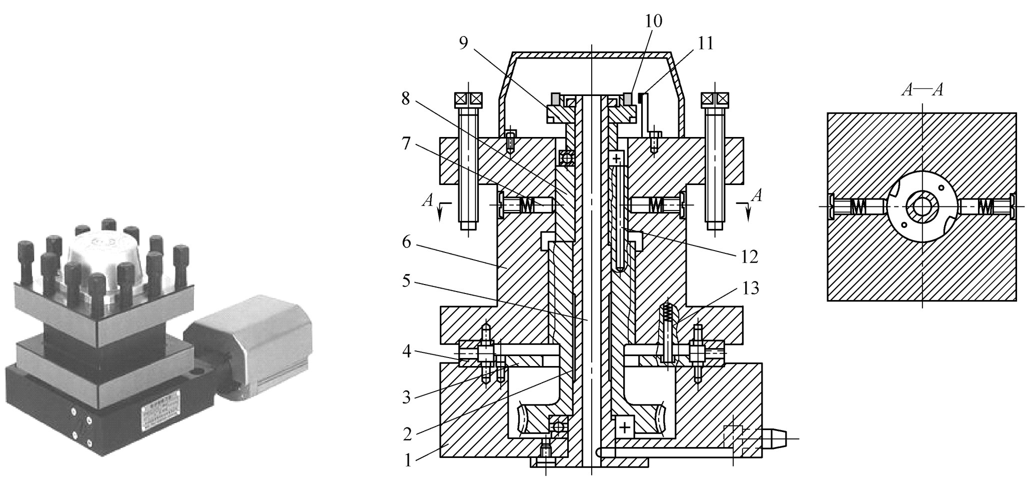
1.3 辅助装置

数控机床的辅助装置是为切削加工服务的，除了上述的数控车床主轴液压卡盘、加工中心松紧刀装置等，还有数控车床的刀架及液压尾座，加工中心的刀库及换刀装置，数控分度工作台和回转工作台等辅助装置，各种辅助装置的动作过程通常由数控系统中的 PLC 控制。

1.3.1 数控车床的刀架

1. 四方电动刀架

图 1-22 所示为普通型数控车床中常用的四方电动刀架。



a)　　b)

图 1-22　四方电动刀架

a）外观　b）内部结构

1—刀架底座　2—蜗轮螺杆　3—定位盘　4—端面齿盘　5—空心主轴　6—刀架体　7—球头销　8—转位套　9—发信盘　10—霍尔开关　11—磁钢　12—圆柱销　13—定位销

该电动刀架采用蜗轮-蜗杆传动，上、下齿盘啮合，以及螺杆夹紧的工作原理，同时用霍尔开关检测换刀刀位。其工作过程包括刀架抬起、刀架转位选刀、刀架反靠定位和刀架下降夹紧。

（1）刀架抬起　当数控系统发出换刀 T 指令后，刀架电动机正转起动，通过联轴器使蜗杆转动。蜗轮与螺杆为整体结构（蜗轮螺杆），蜗轮螺杆绕空心主轴旋转；螺杆与刀架体中的内螺纹连接，当蜗轮螺杆转动时，由于刀架底座和刀架体上两端面齿还处在啮合状态，且螺杆轴向固定，所以此时刀架体抬起，从而完成刀架抬起动作。

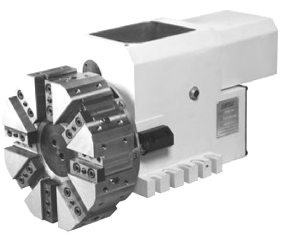
（2）刀架转位　当刀架体抬起到一定距离后，端面齿脱开。转位套用圆柱销与螺杆连接，随螺杆一起转动，当端面齿完全脱开时，球头销（离合销）在弹簧的作用进入转位套

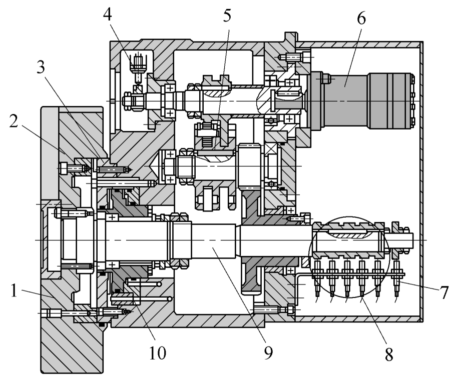
的凹槽中。随着螺杆和转位套继续转动，转位套通过球头销带动刀架体转位，同时，定位销（反靠销）从定位盘上的斜凹槽内起出。刀架体转位的同时也带动磁铁同步转位，与发信盘上的霍尔开关配合进行刀位检测。

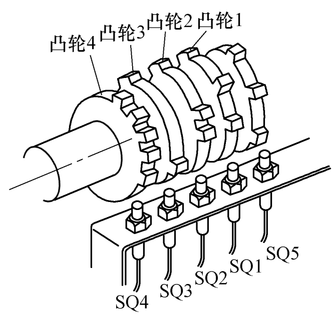
（3）刀架反靠定位和夹紧　当霍尔开关检测到的实际刀位与指令刀位相一致时，表示刀架已转到换刀位置，此时电动机立即停止并开始反转，反转时间由数控系统 PLC 的定时器设定。螺杆带动转位套反转，球头销从转位套的凹槽中被挤出，同时，定位销在弹簧的作用下进入定位盘的斜凹槽中，由于定位销和斜凹槽的限制，刀架体不能转动，只能在当前位置下降，刀架体和刀座上的端面齿啮合实现精确定位。电动机继续反转，刀架体继续下降开始夹紧。反转定时时间到，电动机停止，刀架体和刀座上两个端面齿保持一定的夹紧力，从而夹紧刀架。

2. 转塔刀架

转塔刀架常用于斜床身数控车床的换刀装置中，转塔头各刀座中安装有不同用途的刀具，通过转塔头的旋转分度和定位实现换刀。转塔刀架有液压转塔刀架、伺服转塔刀架、电动转塔刀架和动力头转塔刀架等类型。图 1-23 所示为液压转塔刀架。







a)　　b)　　c)

图 1-23　液压转塔刀架

a）外观　b）结构　c）凸轮绝对式码盘和接近开关

1—刀塔　2—动齿盘　3—定齿盘　4—计数开关　5—分度凸轮　6—液压马达　7—刀塔夹紧/松开接近开关　8—凸轮绝对式码盘和接近开关　9—刀塔主轴　10—刀塔夹紧/松开液压缸

当数控系统发出换刀指令后，刀塔夹紧液压缸动作使刀塔伸出，动齿盘和定齿盘脱开；液压马达转动，经分度凸轮和齿轮传动带动刀塔主轴使刀塔转过一个刀位，刀塔主轴后端的刀位编码凸轮随主轴一起转动，经接近开关 SQ1~SQ4 输出 4 位二进制编码，每个编码与刀塔上的各个刀位相对应。当指令刀位转到换刀位置时，液压马达停止转动，同时夹紧液压缸动作使刀塔缩回，动齿盘和定齿盘啮合，刀塔夹紧接近开关发出刀塔锁紧的信号，换刀结束。

1.3.2　数控车床的液压尾座

数控车床的液压尾座如图 1-24 所示。

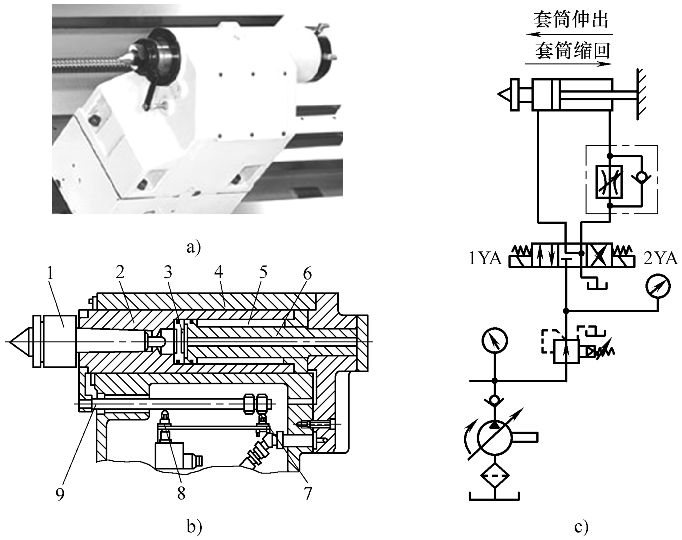


图 1-24　数控车床的液压尾座

a）外观　b）内部结构　c）液压回路

1—顶尖　2—套筒　3—前油腔　4—尾座　5—后油腔　6—活塞杆

7—套筒缩回限位开关　8—套筒伸出限位开关　9—行程杆

顶尖通过锥柄与尾座套筒配合，尾座套筒带动顶尖一起伸缩。手动调整时，三位四通电磁阀失电处于中位，套筒处于浮动状态，可手动调整套筒的伸缩。

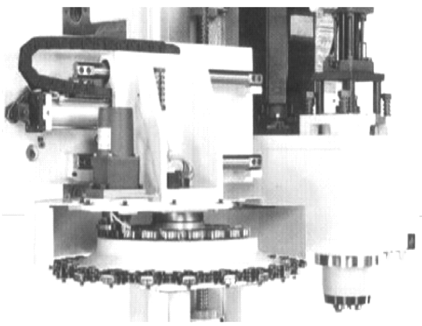
当数控系统发出套筒伸出的指令后，电磁阀线圈 1YA 得电，电磁阀处于左位，压力油通过活塞杆的内孔进入套筒液压缸的前油腔，尾座套筒伸出，直到顶尖顶住工件，顶尖顶住工件的压力保持由减压阀来调节，同时，压力开关接通，发出工件已顶紧的信号。当数控系统发出套筒缩回的指令后，电磁阀线圈 2YA 得电，电磁阀处于右位，压力油进入套筒液压缸的后油腔，尾座套筒缩回。尾座套筒伸出和缩回的限位由各自的限位开关保护。

1.3.3　加工中心的刀库及换刀装置

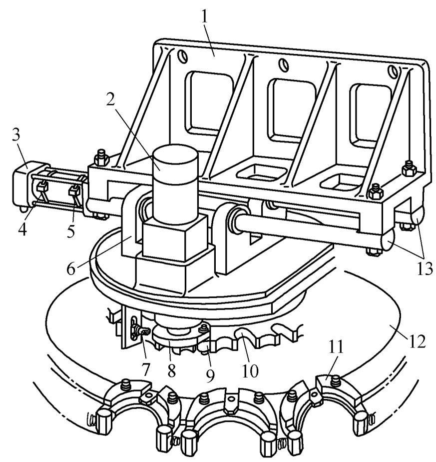
1. 斗笠式刀库

（1）结构及动作过程　斗笠式刀库用于立式加工中心的自动换刀，安装在机床立柱上，其结构如图 1-25 所示。图 1-26 所示为刀库气缸气动控制回路。

刀盘上均布有卡夹，每个卡夹对应一个刀座号，用于夹持刀柄，刀具编号与刀座号相对应；整个刀盘通过滑套悬挂在刀库支架的两根圆柱导轨上，刀库支架上安装有气缸，气缸活塞杆与刀盘连接，活塞杆的伸出或缩回带动刀盘伸出或缩回，伸出或缩回的限位由检测开关进行检测，检测开关可以是安装在气缸上的磁敏开关，也可以是安装在支架上的行程开关或接近开关；刀盘上部连体安装有分度槽轮，刀盘电动机带动凸轮转动，并使滚子绕电动机轴线回转，滚子与分度槽轮配合，凸轮每转过一周，分度槽轮即带动刀盘转过一个刀座（刀盘分度的形式除了槽轮机构外，另一种形式是凸轮间歇运动机构），同时计数开关通断一次。数控系统 PLC 对输入的计数开关信号进行计数，经 PLC 控制，判断指令刀具对应的刀



a)



b)

图 1-25　斗笠式刀库的结构

a）外观（卸掉防护罩后）　b）结构组成

1—支架　2—刀盘电动机　3—刀库气缸　4—刀盘复位检测开关　5—刀盘伸出检测开关

6—滑座　7—计数开关　8—凸轮　9—滚子　10—分度槽轮　11—卡夹　12—刀盘　13—导轨

座是否已转到换刀位置。

（2）换刀过程　斗笠式刀库换刀是一种绝对式换刀，即每次换刀后，刀具号和刀座号是一一对应的。斗笠式刀库无须机械手交换刀具，通过和主轴箱及主轴松紧刀机构的联动实现换刀，其换刀动作过程为：

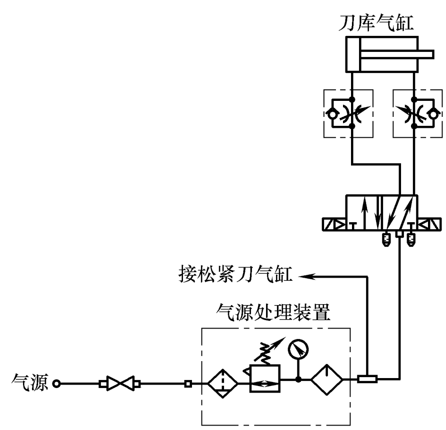


图 1-26　刀库气缸气动控制回路

1）数控系统得到换刀指令后，主轴自动返回到换刀点，同时主轴实现准停控制。

2）刀盘旋转，将与当前主轴上刀具号（设为旧刀具）对应的刀座号转到换刀点。

3）刀盘从原位由气缸活塞杆推出，当卡夹抓住主轴上的旧刀具时，刀盘伸出检测开关接通，表示抓刀完成。

4）主轴松紧刀气缸动作，主轴上的旧刀具松开，且对主轴锥孔吹气，当主轴松刀到位开关接通时，表示松刀完成。

5）主轴上移，主轴锥孔中的旧刀具留在刀夹上，拔刀完成。

6）刀库再次旋转，将指令刀具（设为新刀具）对应的刀座号转到换刀点，选刀完成。

7）主轴再次下移至换刀点，新刀具插入主轴锥孔中，插刀完成。

8）主轴松紧气缸动作，新刀具在主轴锥孔中紧刀，当主轴紧刀到位开关接通时，表示紧刀完成。

9）刀盘气缸活塞杆带动刀盘缩回，当刀盘复位检测开关接通时，换刀过程结束。

2. 圆盘式刀库及换刀机械手

圆盘式刀库的换刀过程由刀盘选刀、刀套翻转、机械手换刀和主轴松紧刀等动作联动实现，整个换刀过程由数控系统的 PLC 控制。圆盘式刀库换刀是一种随机式换刀，即每次换刀后，刀具号和刀座号不一定相同。换刀过程中，机械手可同时从刀库和主轴锥孔中进行抓刀、拔刀和插刀，换刀效率高。图 1-27 所示为圆盘式刀库换刀时机械手和刀套的状态。

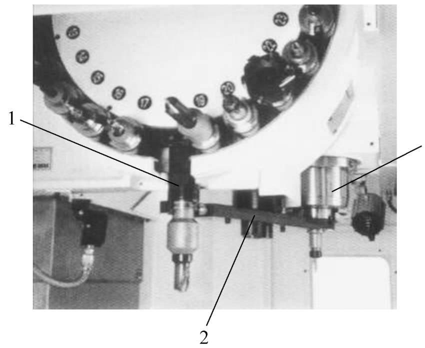


图 1-27　圆盘式刀库换刀时机械手和刀套的状态

1—刀套　2—机械手　3—主轴

圆盘式刀库由刀盘电动机、回转刀盘、分度机构和刀套及翻转机构等组成，刀盘电动机通过分度机构带动回转刀盘转动，刀套通过支架固定在回转刀盘上，随刀盘一起转动。

（1）选刀　执行 T 指令时，数控系统首先判断刀库里有无此刀具，若没有，则系统发出 T 码错误报警；另外，还要判别所选刀具是否在主轴上，若已在主轴上，则完成换刀控制。然后判别所选刀具在刀库中的具体位置，如果所选刀具就在当前换刀位置，刀盘电动机不动作，等待机械手交换刀具；如果所选刀具不在换刀点位置，系统判别所选刀具所在的当前位置转到换刀位置的最短路径及步距数，输出控制信号使刀盘电动机正转或反转，每转过一个刀套，刀盘上的计数开关动作一次。当所选刀具转到换刀位置时，刀盘电动机制动停车，完成 T 指令的选刀控制。

（2）刀套翻转　当刀套转到换刀位置时，刀套轴线垂直于主轴中刀具轴线，为方便机械手同时抓住主轴和刀套中的刀具，换刀前须将刀套向下翻转 90°，使刀套中的刀具轴线与主轴轴线平行；换刀后再将刀套向上翻转 90°复位。图 1-28 所示为刀套翻转示意图。

当所选刀具所在刀套转到换刀位置时，刀套后部的滚子进入拨叉内，气缸前腔进气，活塞上移并带动拨叉使刀套绕销轴向下翻转 90°，刀套向下翻转检测开关发出信号；气缸后腔进气时，活塞下移并带动拨叉使刀套向上翻转 90°，刀套复位检测开关发出信号。

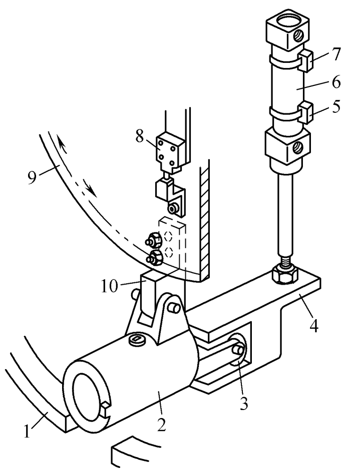


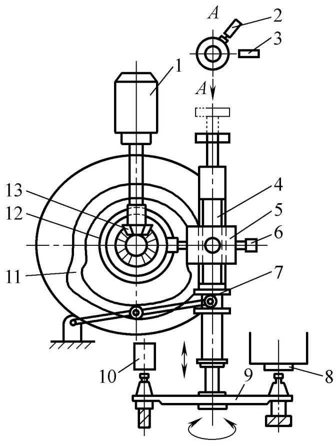
图 1-28　刀套翻转示意图

1—滚道　2—刀套　3—滚轮　4—拨叉　5—刀套复位检测开关　6—气缸　7—刀套向下翻转检测开关　8—计数开关　9—回转刀盘　10—支架

（3）凸轮式换刀机械手　凸轮式换刀机械手和主轴松紧刀配合能连续实现抓刀、拔刀、交换和插刀的动作，如图 1-29 所示。

1）抓刀。机械手电动机第一次起动，电动机通过锥齿轮同时带动端面凸轮和圆柱凸轮旋转，圆柱凸轮带动凸轮滚子使花键轴套旋转，花键轴套再带动机械手轴由原位逆时针方向旋转 65°或 75°，进行机械手抓刀动作。当机械手抓刀到位开关接通时，机械手电动机立即制动停止，完成机械手抓刀控制。在此期间，机械手轴向不动。

2）主轴松紧刀机构动作，卡爪松开主轴锥孔中的刀柄，并发出主轴松开到位信号。



a)



b)

图 1-29　凸轮式换刀机械手

a）传动机构　b）圆柱凸轮及凸轮滚子

1—机械手电动机　2—抓刀到位开关　3—机械手原位开关　4—机械手轴（花键轴）　5—花键轴套
6—凸轮滚子　7—摇臂　8—主轴　9—机械手　10—刀套　11—端面凸轮　12—圆柱凸轮　13—锥齿轮

3）机械手电动机第二次起动，通过锥齿轮同时带动端面凸轮和圆柱凸轮旋转，机械手轴依次完成拔刀、交换和插刀三个动作：①端面凸轮控制摇臂摆动，使机械手轴向下运动，实现拔刀动作，在此期间，凸轮滚子不转动，故机械手也不转动；②拔刀结束，圆柱凸轮通过凸轮滚子带动花键轴套转动，再由花键轴套带动机械手轴旋转 180°，实现刀具交换动作，在此期间，摇臂不摆动，机械手轴不动；③端面凸轮再次控制摇臂摆动，使机械手轴向上运动，实现插刀动作，在此期间，凸轮滚子不转动，故机械手也不转动。当抓刀到位开关再次接通后，机械手电动机立即制动停止。

4）主轴松紧刀机构动作，卡爪夹紧主轴锥孔中的刀柄，并发出主轴夹紧到位信号。

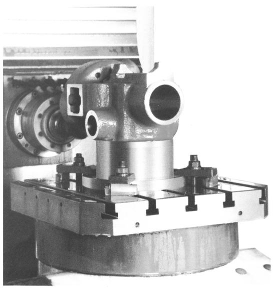
5）机械手电动机第三次起动，圆柱凸轮带动凸轮滚子使花键轴套旋转，花键轴套再带动机械手轴顺时针方向旋转 65°或 75°，实现复位动作。当机械手回到原位后，原位开关接通，机械手电动机立即制动停车。

凸轮式换刀机械手通过凸轮等机械传动机构，配合机械手电动机的三次起停，实现了原位→抓刀→拔刀（主轴松刀）→交换→插刀（主轴紧刀）→复位的动作过程。

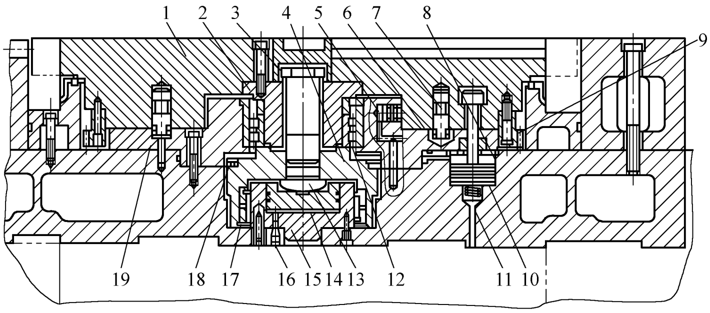
1.3.4　数控分度工作台和数控回转工作台

1. 分度工作台

数控分度工作台常用于卧式数控铣镗加工中心中，其功能是，通过工作台的圆周分度，将工件转位换面，与自动换刀功能配合，实现工件一次装夹完成几个面的多工序加工，提高了加工效率，特别适合于箱体类零件的加工。数控分度工作台的分度和定位有定位销式和鼠齿盘式，数控分度工作台只能完成分度运动，不能实现圆周进给运动，数控分度工作台的分度动作由数控系统的 PLC 控制。图 1-30 所示为定位销式数控分度工作台。



a)



b)

图 1-30　定位销式数控分度工作台

a）外观　b）结构

1—工作台　2—转台轴　3—六角螺钉　4—轴套　5—消隙液压缸　6—定位衬套　7—定位销
8—夹紧液压缸　9—齿轮　10—夹紧液压缸活塞　11—弹簧　12—双列滚柱轴承　13—止推螺钉
14—中央液压缸活塞　15—中央液压缸　16—液压油管道　17、18—止推轴承　19—转台座

数控分度工作台的动作过程包括：工作台松开并抬起、工作台回转分度、工作台下降并锁紧。

（1）工作台松开并抬起　数控系统发出分度指令，底座上均布的夹紧液压缸卸荷，夹紧液压缸活塞被弹簧顶起，液压缸活塞顶端的 T 形头松开工作台；同时，消隙液压缸卸荷，工作台处于松开状态。中央液压缸下腔进油，其活塞上升，并通过止推螺钉和转台座将工作台抬起，固定在工作台面中的定位销从定位衬套中拔出，工作台处于抬起状态。

（2）工作台回转分度　液压马达或电动机转动，通过减速齿轮带动固定在工作台面下的齿轮 9 转动进行分度。当工作台即将到达分度位置时，工作台上的挡块碰撞限位开关，工作台减速并停止转动，此时，定位销正好对准定位衬套孔，分度完成。

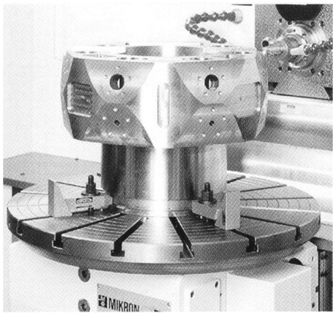
（3）工作台下降并锁紧　中央液压缸卸荷，工作台靠自重下降，定位销插入定位衬套孔中，完成定位动作。接着，消隙液压缸进油，其活塞顶住工作台，消除可能出现的径向间隙；同时，夹紧液压缸进油，推动活塞下降，活塞顶端的 T 形头拉紧工作台，工作台处于锁紧状态。

2. 数控回转工作台

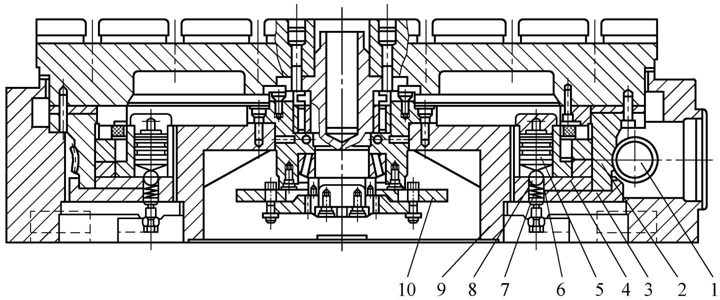
数控回转工作台除了分度和转位功能外，还可以作为回转伺服轴实现圆周进给运动，以及与其他伺服轴联动。图 1-31 所示为卧式数控回转工作台。

数控回转工作台的分度转位和圆周进给由伺服电动机通过蜗轮-蜗杆传动实现，并由夹紧液压缸对工作台进行夹紧和松开。工作台静止时，必须处于锁紧状态，为此，在蜗轮底部的径向安装有几对夹紧瓦，并在底座上均布同样数量的夹紧液压缸。当夹紧液压缸的上腔接通压力油时，活塞便压向钢球，使夹紧瓦相互收缩并夹紧蜗轮；在工作台需要回转时，夹紧液压缸卸荷，在弹簧的作用下，钢球抬起，夹紧瓦相互分开将蜗轮松开。

数控回转工作台的导轨面由大型滚动轴承支承，并由圆锥滚柱轴承及双列向心圆柱滚子轴承保持准确的回转中心。分度工作台实际转动的角度由高精度圆光栅直接进行检测，或者通过伺服电动机中的编码器间接进行检测，检测信号反馈给数控系统进行位置控制。



a)



b)

图 1-31　卧式数控回转工作台

a）外观　b）结构

1—蜗杆　2—蜗轮　3、4—夹紧瓦　5—夹紧液压缸　6—活塞　7—弹簧

8—钢球　9—底座　10—圆光栅

随着力矩电动机在数控回转工作台中的应用，出现了直接驱动数控回转工作台。在直接驱动数控回转工作台中，电动机转子直接与回转工作台连接，省却了蜗轮-蜗杆等传动链，简化了机械结构，提高了传动精度。

1.4　进给机械传动的特性

对于滚珠丝杠进给传动系统，负载转矩和惯量是选择伺服电动机的重要依据，是影响进给传动系统运动快速性、准确性和稳定性的重要因素。

1.4.1　负载转矩

计算负载转矩的目的就是，将进给传动系统中的各种力及转矩折算到伺服电动机的轴上，包括切削力产生的切削转矩、摩擦力产生的摩擦转矩及重力产生的重力转矩等。图 1-32 所示为进给传动系统的负载组成。

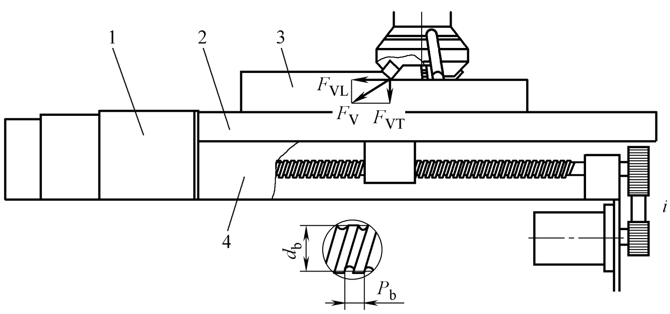


图 1-32　进给传动系统的负载组成

1—防护罩　2—工作台　3—工件　4—导轨

1. 切削转矩

切削力折算到伺服电动机轴上的转矩来自于切削加工时轴向切削力 F_{VL}，F_{VL} 折算到电动机的转矩 T_V 为

$$T_V = \frac{F_{VL} P_b}{2\pi i \eta_M \eta_b}$$

式中 F_{VL}——切削力在轴向的分力（N）；

P_b——丝杠螺距（m）；

i——减速比（$i \geqslant 1$）；

η_M——减速装置的效率，当伺服电动机与丝杠直连时，i 和 η_M 均为 1；

η_b——滚珠丝杠螺母副的传动效率。

2. 摩擦转矩

进给传动系统摩擦力折算到电动机轴上的摩擦转矩，包括导轨摩擦转矩、防护罩摩擦转矩及丝杠支承轴承预紧转矩等。

（1）导轨摩擦转矩　导轨摩擦力折算到电动机轴上的摩擦转矩 T_g 为

$$T_g = \frac{\mu_g P_b}{2\pi i \eta_M \eta_b}(mg\cos\alpha + F_{VT} + F_{gp})$$

式中 μ_g——导轨的摩擦因数；

m——工件、工作台及拖板的质量（kg）；

g——重力加速度，$g = 9.81\text{m/s}^2$；

α——轴倾斜角度，由机床结构决定，水平轴 $\alpha = 0°$，垂直轴 $\alpha = 90°$；

F_{VT}——切削力在垂直方向的分力（N）；

F_{gp}——滚动导轨预载荷（预紧力）（N）。

（2）防护罩摩擦转矩　数控机床导轨常用多级伸缩式防护罩（图 1-33），其刮板与防护罩之间的摩擦力与宽度有关，见表 1-1。

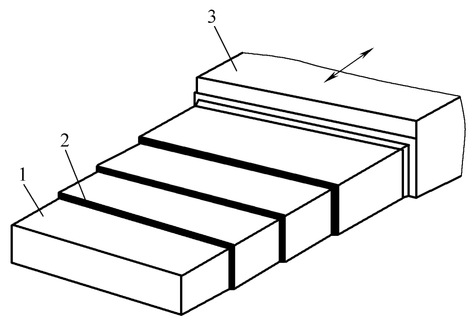


图 1-33　多级伸缩式防护罩

1—不锈钢伸缩防护罩　2—刮板　3—工作台

表 1-1　刮板与防护罩之间的摩擦力

宽度/m	0~1	1~2	2~3
摩擦力 F_s/(N/m)	180	220	250

工作台两侧通常安装防护罩，工作台移动时，一侧的防护罩伸出，另一侧的防护罩缩回。设防护罩宽度为 B，则单侧防护罩产生的摩擦力折算到电动机轴上的摩擦转矩 T_s 为

$$T_s = \frac{P_b F_s B}{2\pi i \eta_M \eta_b}$$

（3）丝杠支承轴承摩擦转矩　丝杠支承轴承的摩擦转矩通常很小，可忽略。但对于双端支承且轴向预紧的丝杠，须考虑预紧力产生的摩擦转矩，其折算到电动机轴上的摩擦转矩 T_b 为

$$T_b = \frac{\mu_b d_b}{2\pi i \eta_M}(F_{bp} + F_{sp})$$

式中 μ_b——支承轴承的摩擦因数，一般为 0.003~0.005；

d_b——支承轴承的平均直径（m）；

F_{bp}——支承轴承的预紧力（N）；

F_{sp}——丝杠预紧力（N）。

则总摩擦转矩 T_R 为

$$T_R = T_g + T_s + T_b$$

3. 重力转矩

当轴水平安装时，无须考虑重力转矩，但对于垂直轴或倾斜轴，如数控铣床或加工中心主轴箱垂直上下运动、斜床身数控车床 X 轴的刀架运动，则主轴箱或刀架折算到电动机轴上的重力转矩 T_G 为

$$T_G = \frac{P_b}{2\pi i \eta_M \eta_b} mg\sin\alpha$$

由此，进给机械传动系统各负载折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 为

$$T_L = T_V + T_R + T_G$$

【例 1-1】 某立式加工中心，已知：

1）工件质量为 450kg，工作台质量为 180kg。

2）X 轴滚珠丝杠直径为 ϕ40mm，螺距为 12mm，长度为 1000mm，丝杠材料密度为 7847kg/m^3；丝杠与伺服电动机通过联轴器直连，联轴器惯量为 0.3×10^{-3}kg·m^2，丝杠传动效率为 0.93。

3）X 轴丝杠两端轴承支承且预紧，支承轴承的摩擦转矩为 0.6N·m。

4）X 轴导轨为直线滚动导轨，摩擦因数为 0.003，每个滑块预载荷为 838N。

5）X 轴防护罩为多级伸缩式防护罩，宽度为 550mm。

6）切削力在 X 轴的轴向分力为 4500N，垂直方向分力为 1000N。

根据已知条件，得到：质量 m = 450kg + 180kg = 630kg，丝杠螺距 P_b = 12mm，减速比 i=1，减速装置效率 η_M=1，丝杠传动效率 η_b=0.93，支承轴承的摩擦转矩 T_b=0.6N·m。

导轨摩擦因数 μ_g=0.003，导轨预载荷 F_{gp} = 838N×4（4 个滑块）= 3352N，切削力轴向分力 F_{VL}=4500N，切削力在垂直方向的分力 F_{VT} = 1000N，防护罩摩擦阻力 F_s = 180N/m×0.55m×2（双侧）= 198N。

X 轴负载转矩计算：

1. 切削转矩

$$T_V = \frac{F_{VL}P_b}{2\pi i \eta_M \eta_b} = \frac{4500\text{N}\times0.012\text{m}}{2\pi\times1\times1\times0.9} = 9.25\text{N}\cdot\text{m}$$

2. X 轴摩擦转矩

（1）导轨摩擦转矩

$$\begin{aligned} T_g &= \frac{\mu_g P_b}{2\pi i \eta_M \eta_b}(mg\cos\alpha + F_{VT} + F_{gp}) \\ &= \frac{0.003\times0.012\text{m}}{2\pi\times0.93}\times(630\text{kg}\times9.81\text{m/s}^2\times\cos0^\circ+1000\text{N}+3352\text{N}) \\ &= 0.06\text{N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

（2）防护罩摩擦转矩

$$T_s = \frac{P_b F_s}{2\pi i \eta_M \eta_b} = \frac{0.012\times198}{2\pi\times1\times1\times0.93} = 0.4\text{N}\cdot\text{m}$$

（3）支承轴承摩擦转矩

$$T_b = 0.6\text{N}\cdot\text{m}$$

所以，X 轴摩擦转矩为

$$T_R = T_g + T_s + T_b = 0.06\text{N}\cdot\text{m} + 0.4\text{N}\cdot\text{m} + 0.6\text{N}\cdot\text{m} = 1.06\text{N}\cdot\text{m}$$

3. 重力转矩

因为 X 轴为水平轴，故重力转矩 $T_G = 0$。

1.4.2 负载惯量

伺服电动机驱动滚珠丝杠的进给传动系统中，负载惯量包括旋转运动部件惯量和直线运动部件惯量折算到电动机轴上的惯量。

1. 旋转运动部件惯量

旋转运动部件惯量包括伺服电动机转子惯量、滚珠丝杠惯量、联轴器及齿轮或同步带轮惯量等。当伺服电动机与滚珠丝杠间有传动比 i 时，滚珠丝杠、齿轮或同步带轮惯量折算到电动机轴上的惯量 J_r 为

$$J_r = \frac{\pi\rho d^4 l}{32i}$$

式中　ρ——旋转部件材料密度（kg/m^3）；

d——实心圆柱体直径（m）；

l——实心圆柱体长度（m）。

2. 直线运动部件惯量

工作台和工件、主轴箱或刀架等直线运动部件折算到电动机轴上的惯量 J_l 为

$$J_l = m\left(\frac{P_b}{2\pi i}\right)^2$$

由此，负载折算到电动机轴上的惯量 J_L 为

$$J_L = J_r + J_l$$

【例 1-2】 根据例 1-1 提供的数据，计算 X 轴的惯量。

（1）滚珠丝杠折算到电动机轴上的惯量 J_b

$$J_b = \frac{\pi\rho d_{bs}^4 l}{32i} = \frac{\pi\times 7847\text{kg/m}^3\times(0.04\text{m})^4\times 1\text{m}}{32\times 1} = 1.97\times 10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

式中　d_{bs}——丝杠直径（m）。

（2）联轴器折算到电动机轴上的惯量 J_c

$$J_c = 0.3\times 10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

所以，旋转惯量为

$$J_r = J_b + J_c = 1.97\times 10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2 + 0.3\times 10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2 = 2.27\times 10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

（3）工作台和工件折算到电动机轴上的惯量 J_l

$$J_l = m\left(\frac{P_b}{2\pi i}\right)^2 = 630\text{kg}\times\left(\frac{0.012\text{m}}{2\pi\times 1}\right)^2 = 2.30\times 10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

所以，X 轴上各负载折算到伺服电动机轴上的负载惯量为

$$J_L = J_r + J_1 = 2.27\times10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2 + 2.30\times10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2 = 4.57\times10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

1.4.3　动态特性

进给机械传动是进给伺服系统组成环节之一，是位置闭环的组成部分。图 1-30 所示的传动机构可以描述为由质量块 m、弹性系数为 k 的连接件以及阻尼系数为 c 的阻尼件组成的二阶振荡环节，其传动模型和传递函数如图 1-34a、b 所示。

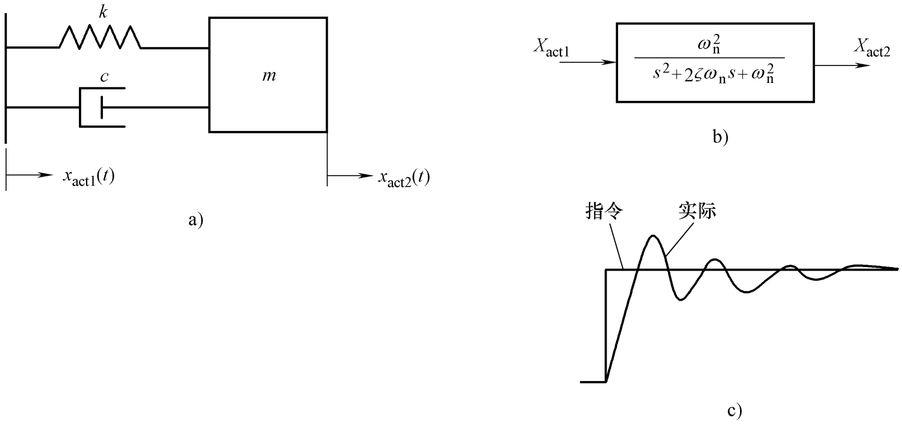


图 1-34　进给机械传动模型及传递函数

a）机械传动模型　b）进给机械传递函数　c）位置输入和输出响应

图 1-34a 中，$x_{act1}(t)$ 是机械传动的位置指令输入，该指令值与伺服电动机转速、丝杠螺距及传动比等因数有关；$x_{act2}(t)$ 是工作台的实际位置输出。质量 m 包括工作台和工件的质量；弹性系数 k 反映了传动系统的刚度，包括滚珠丝杠、联轴器及工作台的弹性变形等；阻尼系数 c 反映了机械传动的摩擦和润滑特性。由于进给机械传动二阶振荡环节的特性，其位置指令输入和实际输出响应如图 1-34c 所示。

图 1-34b 中，机械传动的固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ 分别为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

当输入信号的频率等于机械传动系统的谐振频率时，系统就会产生共振而不能正常工作。谐振频率 ω_r 为

$$\omega_r = \omega_n\sqrt{1-2\zeta^2}$$

阻尼比 ζ 越小，则谐振频率越接近于固有频率。实际应用中，因为阻尼比 ζ 较小，所以用固有频率来近似谐振频率。通常机械传动系统的固有频率 ω_n 为 160~720rad/s，对应的频率为 25~115Hz。

对于机械传动系统，因为固有频率取决于系统的刚度，所以提高刚度可以提高机械传动系统的固有频率，以避免系统产生振动，提高机械传动运行的稳定性，以及减小系统的死区误差（失动量）。数控机床进给机械传动所采取的各种调整手段，如消除传动间隙，丝杠、导轨及轴承的预紧等，都是为了达到提高刚度的目的。

思考题与习题

1. 填充题

（1）滚珠丝杠螺母副是一种______的传动部件，其中，______由伺服电动机带动，实现旋转运动，______与工作台等部件连接，实现直线运动。工作台的进给速度和方向由伺服电动机的______和______决定。

（2）滚珠丝杠的螺距是指______，丝杠螺距累积误差会影响______精度。

（3）滚珠丝杠采用双螺母的目的是______及______，常用的消隙方法有______和______等。

（4）滚珠丝杠支承的方式有______、______和______，对丝杠轴承进行预紧能提高传动的______。

（5）滚珠丝杠垂直安装时，为防止失电时主轴箱、刀架等的自由下落，通常在与其连接的伺服电动机中安装______，该装置______时松开，______时锁紧。

（6）导轨的作用是______和______，数控机床导轨的主要类型有______和______等。前者，为克服爬行现象，常采用______，其侧向间隙和预紧由______进行调整；后者由______和______等组成。

（7）进给传动系统负载折算到伺服电动机轴上的参数为______和______。

（8）数控机床主运动的形式有______、______和______。数控车床主轴上除了安装普通卡盘外，还可选装______，另外，主轴通过传动比为 1∶1 的同步带连接______，用于主轴______和______的测量；数控铣床和加工中心主轴锥孔中有松紧刀机构，该机构由______、______、______和______等组成。

（9）______和______是所有数控机床必须具备的辅助功能，辅助装置的动作由数控系统的______进行控制。

（10）数控车床四方电动刀架的换刀过程有______→______→______等；液压转塔刀架中，转塔头的分度旋转由______带动，转塔头的夹紧和松开由______带动，转塔头的精定位由______实现。

2. 简答题

（1）滚珠丝杠与伺服电动机的连接有哪些方式？

（2）丝杠螺距累积误差是怎样产生的？对丝杠螺距累积误差进行补偿的目的是什么？

（3）数控机床主轴采用齿轮换档的目的是什么？齿轮换档有哪些方式？

（4）根据加工中心主轴松紧刀机构，用流程图说明主轴松紧刀的过程。

（5）斗笠式刀库换刀过程中，主轴锥孔中刀柄的抓刀是怎样实现的？拔刀和插刀又是怎样实现的？

（6）圆盘式刀库换刀过程中，抓刀是怎样实现的？拔刀和插刀又是怎样实现的？

（7）数控分度工作台和数控回转工作台有什么区别？

（8）提高进给机械传动刚度的目的是什么？有哪些措施？

3. 设计计算题

某立式加工中心，已知：

1）工件质量为 450kg，工作台质量为 180kg，Y 轴拖板等部件质量为 220kg。

2）Y 轴滚珠丝杠直径为 ϕ40mm，螺距为 12mm，长度为 800mm，丝杠材料密度为 7847kg/m^3；丝杠与伺服电动机通过联轴器直连，联轴器惯量为 0.3×10^{-3}kg·m^2，丝杠传动效率为 0.93。

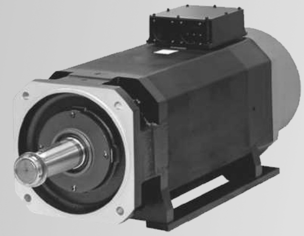
3）Y 轴丝杠两端轴承支承且预紧，支承轴承的摩擦转矩为 0.6N·m。

4）Y 轴导轨为直线滚动导轨，摩擦因数为 0.003，每个滑块预载荷为 838N。

5）Y 轴防护罩为多级伸缩式防护罩，宽度为 650mm。

6）切削力 Y 轴分力为 1000N。

计算 Y 轴各负载折算到伺服电动机轴端的摩擦转矩和转动惯量。



第 2 章

主轴电动机及驱动

数控机床的主轴是通过主轴电动机来带动的，数控系统通过对主轴电动机的控制来实现对主轴的控制。当前，数控机床主轴电动机普遍使用三相交流异步电动机及变频驱动，主轴电动机驱动有两种配置形式：普通三相交流异步电动机和变频器；数控系统配套的专用主轴电动机和主轴驱动器。前者常用于普通数控机床中，实现变频调速，正、反转起动和停止等基本控制；后者用于多功能数控机床中，除了主轴基本控制外，还可实现定向、定位及主轴伺服等控制。

2.1　三相交流异步电动机及变频调速

2.1.1　三相交流异步电动机

1. 结构组成

普通三相交流异步电动机由定子和转子等组成，如图 2-1 所示。

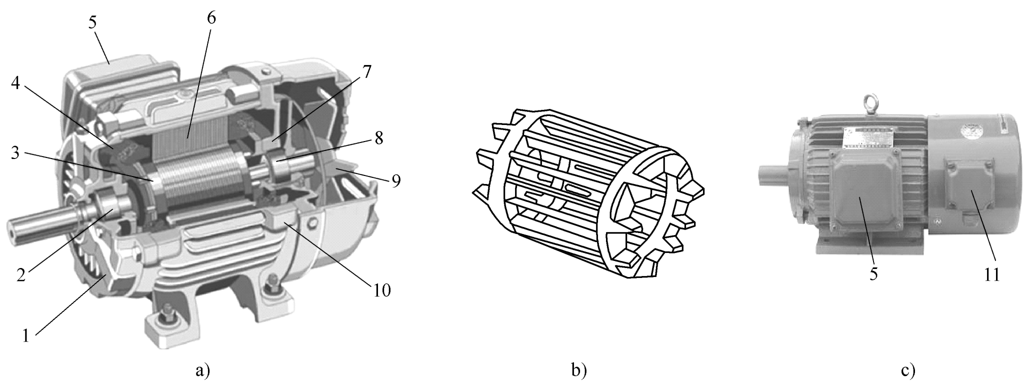


图 2-1　三相交流异步电动机

a）内部结构及组成　b）笼型转子导条　c）变频专用异步电动机

1—前端盖　2—前轴承　3—转子　4—定子绕组　5—电源接线盒　6—定子铁心

7—后端盖　8—后轴承　9—冷却风扇　10—机座　11—风扇电动机电源接线盒

定子包括机座、定子铁心和定子三相绕组，定子铁心由硅钢片叠装而成，内圆周均布有线圈槽，线圈槽内嵌有三相对称绕组，绕组端子引入机座上的接线盒内，可接成三角形绕组

或星形绕组；转子也由硅钢片叠装而成，外圆周均布有线圈槽，线圈槽内浇铸有铝导条，图 2-1b 所示为去掉转子铁心后的笼形转子导条，定子和转子之间有气隙。普通异步电动机的转子上还安装有散热风扇，当普通三相交流异步电动机用变频器进行调速，且转子转速较低时，若散热风扇的风量不足以对电动机进行冷却，则电动机容易发热，严重时会损坏定子绕组绝缘，造成短路。为适应变频调速的需要，出现了一种变频专用异步电动机，如图 2-1c 所示。变频专用异步电动机有专门的散热风扇电动机，对电动机本体进行强制冷却，风扇电动机单独供电，风扇的风量与电动机转速无关。另外，变频专用异步电动机还提高了定子绕组的绝缘性能，有些变频专用异步电动机定子绕组中还埋设有热敏电阻，用于检测电动机的温度。

2. 运行原理

三相交流异步电动机的运行原理如图 2-2 所示。

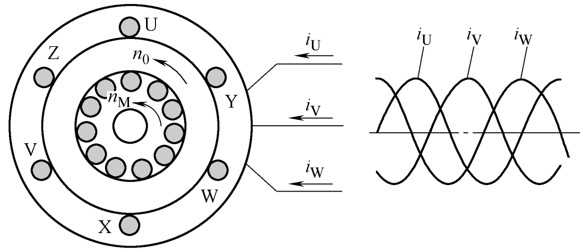


图 2-2　三相交流异步电动机运行原理

三相交流异步电动机定子绕组通入三相交流电后，在定子与转子的气隙间产生旋转磁场，其转速 n_0 称为同步转速，$n_0=60f/p$，p 为定子绕组极对数，f 为定子绕组电源频率，改变 f 即改变 n_0。旋转磁场切割转子铁心中的导条，并在导条中产生感应电流。这样，有感应电流的转子导条与旋转磁场相互作用产生电磁转矩，转子在电磁转矩的作用下跟随旋转磁场以转速 n_M 旋转。因为在电动机运行状态下，转子转速只能小于同步转速（$n_0>n_M$），故称为异步电动机，又因为转子导条中的电流由旋转磁场感应而来，所以又称为感应电动机。当电源频率 f 下降时，旋转磁场转速 n_0 随之下降，但由于转子的机械惯性，转子转速 n_M 瞬间维持不变，此时，转子转速大于旋转磁场转速（$n_M>n_0$），电动机处于回馈制动状态，即有电流从电动机绕组中流出，电动机转速下降直至当前频率所对应的转速。

2.1.2　变频调速

改变电动机的电源频率可实现电动机的调速。变频调速过程中，为了满足三相交流异步电动机定子绕组电磁特性的要求，在额定转速以下变频调速时，电动机电磁转矩保持不变，电动机功率与转速成正比，实现恒转矩调速；在额定转速以上变频调速时，电动机功率不变，且电磁转矩与电动机转速成反比，实现恒功率调速，如图 2-3 所示。

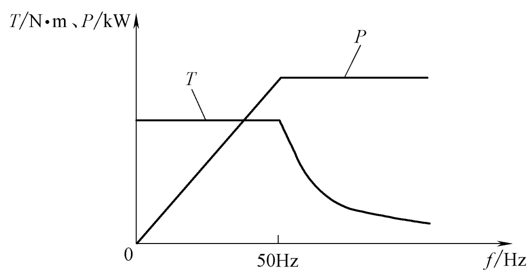


图 2-3　变频调速时转矩和功率与转速的关系

三相交流异步电动机变频调速通常有 U/f 和矢量控制方式。在 U/f 控制方式中，通过控制随频率变化的电压，且 U/f 值保持恒定，实现变频调速。矢量控制就是构建一个数学模型，将交流电动机等效成直流电动机，因为直流电动机有优良的调速性能，且直流电动机的调速可分别通过控制转矩电流（恒转

矩调速）或励磁电流（恒功率调速）来实现，所以矢量控制的结果就是，通过控制等效的转矩电流或励磁电流来控制三相电动机定子绕组的三相电流，从而获得优良的调速性能。

2.1.3 变频器

1. 变频控制

变频器本质上是一种电源变换装置，数控机床中所用的变频器通常为电压型“交-直-交”变频器，如图 2-4 所示。变频器根据频率给定信号，将输入的正弦波交流电（如三相 380V/50Hz）经内部控制电路和功率开关，输出电压和频率可变的、与正弦波等效的三相方波电压，从而实现对电动机的变频调速。

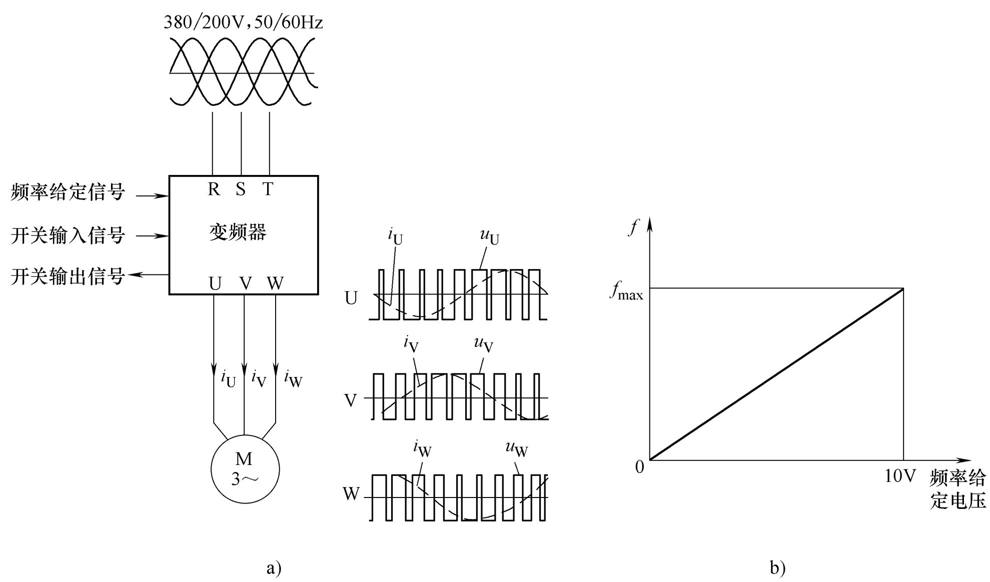


图 2-4 变频调速
a）变频器控制信号及输出电压和电流 b）频率给定电压

频率给定有各种信号形式，如电压、电流模拟量频率给定，开关数字量固定频率给定，以及总线和网络频率给定等。其中，0～+10V 电压与变频器输出电源频率呈线性关系，改变给定电压的大小即可改变输出频率的高低，从而实现变频调速。例如：设给定电压 10V 对应输出频率 50Hz，若变频器接 4 极（极对数 $p=2$）三相异步电动机，则电动机转速为 1470r/min；若给定电压为 5V，则变频器输出电源频率为 25Hz，此时电动机转速约为 735r/min。数控机床模拟主轴控制中，数控系统通过执行 S（主轴转速）指令，经运算处理输出 0～+10V 频率给定电压给变频器。

变频器中的输入开关信号包括变频器运行的控制信号，如正转、反转、停止等信号，输出开关信号包括变频器报警、运行状态等信号。数控机床中，变频器的开关信号由数控系统的 PLC 进行控制，数控系统通过执行 M03、M04 及 M05 等指令，经 PLC 程序对变频器的输入、输出开关信号进行控制。

数控机床专用主轴电动机的变频器是总线形式的数字信号，如 FANUC αi 及βi 系列主轴驱动器的主轴串行总线，西门子 611Ue 驱动器的 PROFIBUS 总线，以及西门子 S120 驱动器

DRIVE-CLiQ 驱动总线等。

2. 变频器的基本组成

变频器主要由主电路和控制电路组成，主电路上有功率模块、驱动电路等；控制电路上有由微处理器组成的控制电路、检测电路、输入/输出电路等，还包括辅助电源、操作面板和显示单元等，如图 2-5 所示。

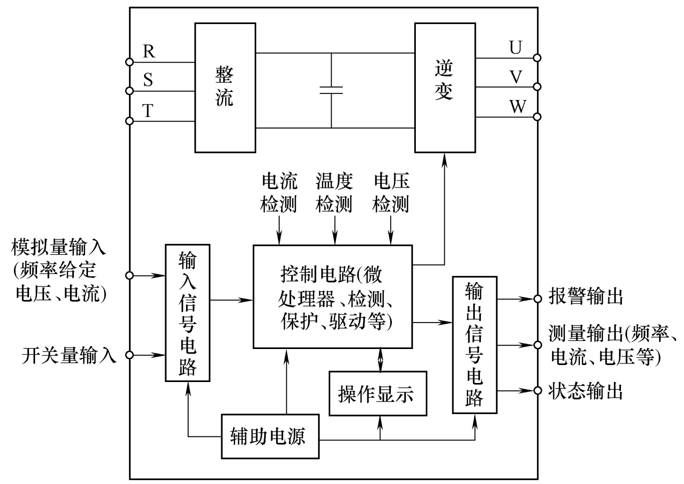
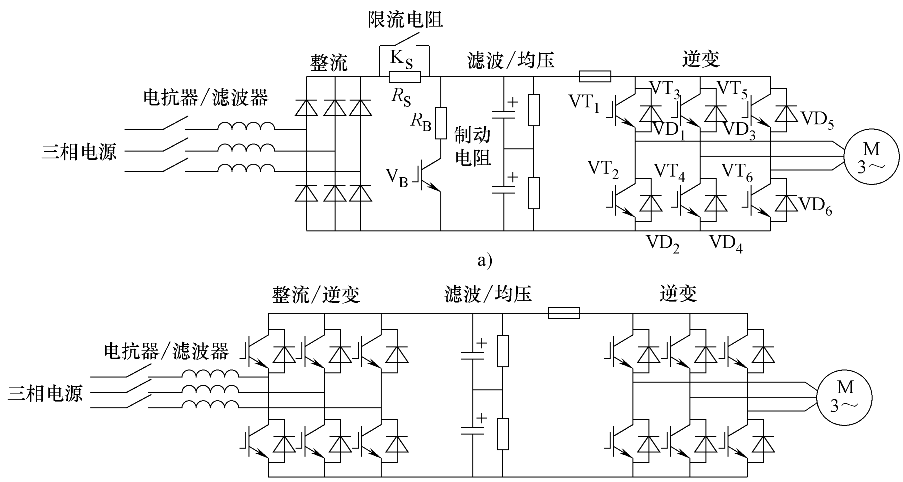


图 2-5　变频器的基本组成

（1）主电路　变频器主电路为电压型“交-直-交”电路，由大功率晶体管和大容量电容等组成，根据电动机制动方式的不同，有能耗制动方式的主电路和回馈制动方式的主电路，如图 2-6 所示。



a)

b)

图 2-6　电压型“交-直-交”变频器主电路

a）能耗制动方式的主电路　b）回馈制动方式的主电路

1）整流和滤波。整流和滤波电路通常由二极管整流模块和大容量电解电容等组成，其作用就是把输入的正弦波交流电转换成直流电源，如输入电压为 380V 时，整流滤波后的平

均直流电压为530V，该直流电压称为直流母线电压 U_{PN}。

为了抑制整流产生的电流高次谐波对电网的影响，提高功率因数，变频器输入端要安装电抗器，小容量变频器内置有电抗器，大容量变频器需外置电抗器，必要时还可选装输入滤波器。

2）逆变及驱动电路。逆变电路是基于SPWM（正弦波脉冲宽度调制）技术，通过对 $VT_1 \sim VT_6$ 绝缘栅双极晶体管（IGBT）大功率晶体开关的导通和截止控制，将直流母线电压变换为电压和频率均可变的、与三相正弦波等效的三相方波电压输出。变频器的逆变电路除了IGBT外，还采用集成智能功率模块（IPM），IPM是将IGBT、驱动电路及保护电路等集成在一起的功率模块。

3）制动。在降频减速或制动过程中，电动机处于发电状态，其输出的电流经续流二极管 $VD_1 \sim VD_6$ 和直流母线向滤波电容充电，引起直流母线电压上升。变频器制动有能耗制动和回馈制动两种方式。在能耗制动方式中，如图2-6a所示，当母线电压超过限定值时，变频器控制电路根据检测到的直流母线电压，输出控制信号使制动单元 V_B 导通，母线电压向能耗制动电阻 R_B 释放能量，变频器进行能耗制动；正常运行时，制动单元截止。通常7.5kW以下变频器内置制动电阻，7.5kW以上变频器需外置制动电阻。有些大功率变频器采用电网回馈制动的方式，如图2-6b所示。采用回馈制动方式的变频器，其整流部分由IGBT或IPM组成，电动机运行时，IGBT或IPM处于整流状态；电动机降频减速或制动时，IGBT或IPM为逆变状态，将母线电压逆变为三相交流电回馈给电网，实现回馈制动。

4）限流。在变频器接入电源的瞬间，有一个很大的冲击电流经整流桥向电容充电，为限制充电电流，在整流桥前或后设置限流电阻 R_S。当变频器上电且直流母线电压上升到一定值时，控制电路使接触器触点 K_S 闭合，将限流电阻 R_S 短接，以避免因限流电阻长期接入而降低直流母线电压。

（2）控制电路

1）正弦波脉冲宽度调制（SPWM）。控制电路由DSP（数字信号处理器）芯片和存储器等组成，存储器中有变频器控制软件及变频器运行参数等。控制电路根据频率给定信号，通过控制软件进行 U/f 或矢量运算，获得三相控制电压，再经SPWM和驱动电路，得到控制主电路6个IGBT通断的触发脉冲，经功率放大输出与正弦波等效的、既变频又变压的高频方波电压。SPWM的过程如图2-7所示。

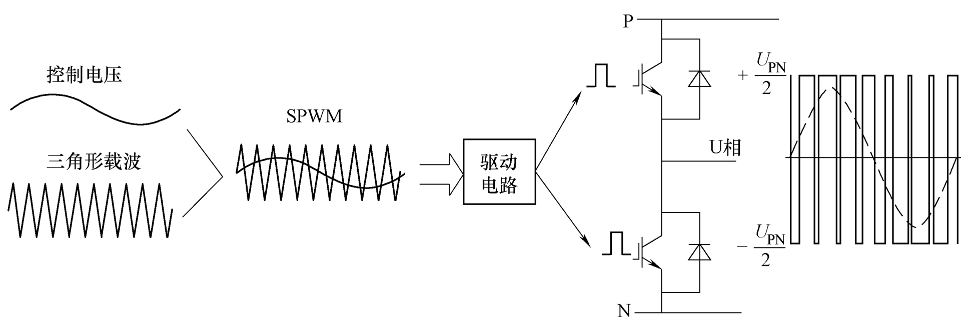


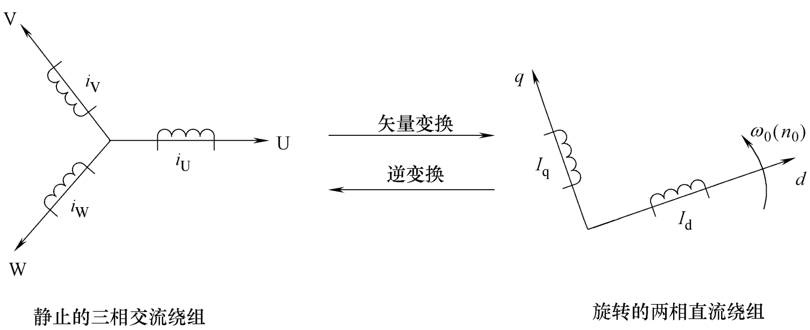
图2-7　SPWM

图2-7中，载波信号由控制电路中的载波发生器产生，控制电压是根据变频器的频率给

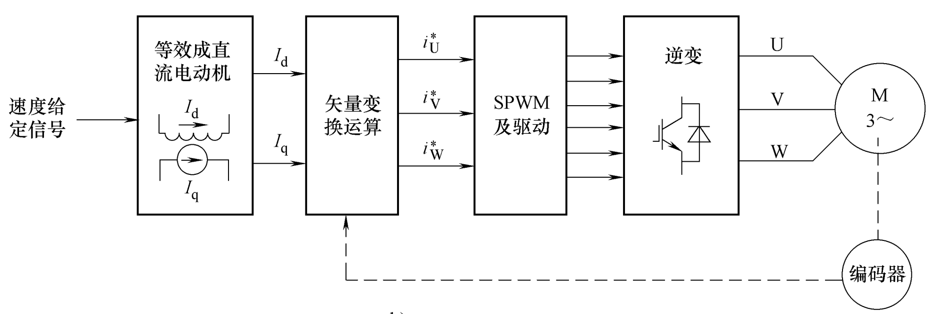
定信号由 U/f 或矢量控制运算获得的。以 U 相为例，载波信号与控制电压进行调制，在某一时刻，当控制电压大于载波时，逆变电路中 U 相上桥臂 IGBT 导通，U 相电压为 $+U_{PN}/2$；当控制电压小于载波时，逆变电路中 U 相下桥臂 IGBT 导通，U 相电压为 $-U_{PN}/2$，最终获得 U 相高频方波电压。

2）U/f 控制。变频器 U/f 控制方式中，通过控制变频器输出电压和频率的比值实现变频调速。U/f 控制方式的变频调速通常无须在电动机轴端安装编码器，即速度开环控制，能满足一般的速度控制要求，但在低频运行时有电动机转矩下降的现象，可通过变频器的电压补偿（又称转矩提升）功能来改善，另外，为克服低频时普通异步电动机靠自身风扇散热困难的问题，可采用变频专用电动机。U/f 控制方式的变频器通常用于普通数控车床的主轴控制中，为扩大主轴的恒功率调速范围，提高低速转矩，主轴通常采用齿轮换档传动。

3）矢量控制。直流电动机通过分别控制励磁电流和转矩电流实现转矩控制，使直流电动机具有优良的调速性能。三相交流异步电动机只在定子绕组中通入定子电流，基于“等效”的概念，将三相交流异步电动机的定子电流经矢量变换运算后等效为产生磁场的电流分量（励磁电流）I_d 和产生转矩的电流分量（转矩电流）I_q，如图 2-8a 所示。矢量控制时，通过逆变换，由等效的励磁电流和转矩电流来控制三相电动机定子绕组的三相电流，从而实现变频控制，使三相交流异步电动机的变频调速具有与直流电动机相同的调速性能，如图 2-8b 所示。



a）



b）

图 2-8　三相交流异步电动机矢量控制

a）矢量变换　b）控制框图

i_U^*、i_V^*、i_W^*—三相电流指令

矢量控制方式的变频器根据电动机上是否有编码器进行速度检测，分为有编码器的矢量控制（速度闭环）和无编码器（速度开环）的矢量控制。矢量变频具有优异的调速性能，表现为速度精度高、调速范围宽、低频转矩大等，矢量变频器通常用于高性能的数控机床主轴控制中，除了速度控制外，还可进行主轴定向、定位、刚性攻螺纹及主轴伺服等控制。

另外，由于矢量运算涉及电动机定、转子的电阻，电感及漏感等参数，所以，异步电动机使用矢量变频器进行调速控制时，初次使用时必须运行变频器自带的测试程序（自整定），即脱开电动机与负载的连接，电动机在测试程序下运行，变频器通过检测电动机的电流，辨识定、转子的电阻、电感及漏感等参数，并存储到变频器的内存中，供矢量计算用。有些专用的矢量变频器内存中已存储有配套的异步电动机的电磁参数，只要输入所使用的电动机序列代码，变频器即可识别该电动机的电磁参数，实现驱动控制的智能化，如 FANUC 系统配套的三相交流主轴电动机和主轴放大器、西门子系统配套的三相交流主轴电动机和主轴放大器等。

（3）驱动电路　驱动电路的作用就是，将 SPWM 调制后的信号转换成 IGBT 通、断的电压信号。驱动电路由专门的集成电路组成。

（4）检测电路　检测电路由运算集成电路等组成，检测电路通过变频器中的电流传感器、温度传感器及电压传感器对变频器的输出电流、功率模块温度及直流母线电压进行检测，实现制动、限流、散热等控制，并进行故障报警。

（5）输入和输出电路　输入和输出电路包括变频器输入开关升降速和固定频率开关控制等，以及报警开关输出、变频器运行状态开关输出等。

（6）操作和显示　使用变频器上的操作和显示面板可实现变频器的基本控制（正、反转起动，停止及点动等），变频器运行参数设置，以及运行状态和报警显示等。

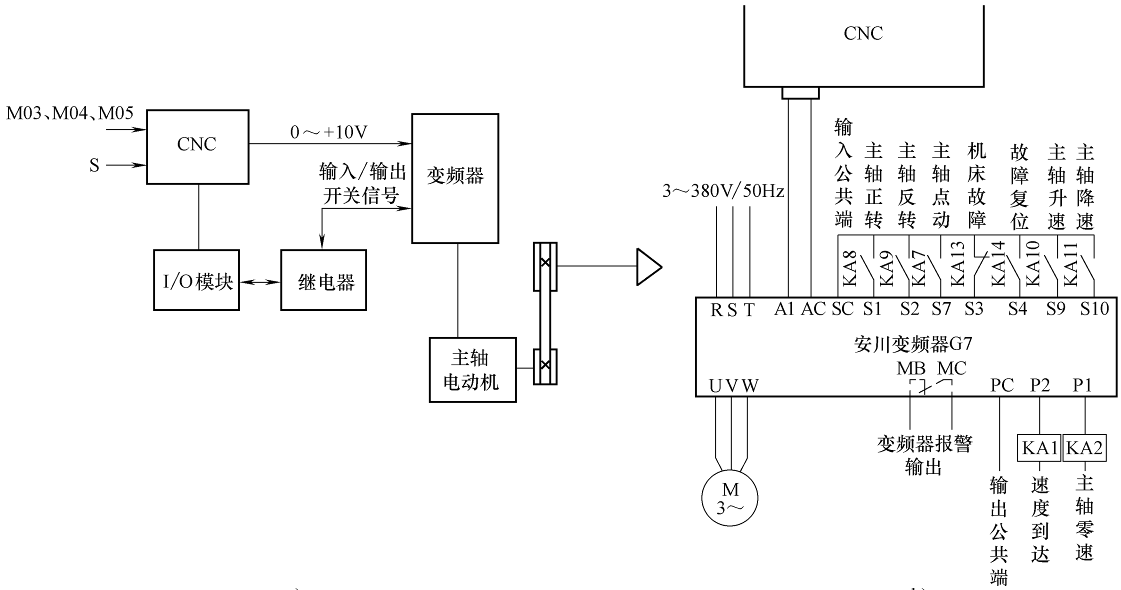
（7）辅助电源　变频器内置有辅助电源，将取自变频器输入电源或直流母线的电压转换成+5V、+15V 和+24V 电源，供变频器中控制电路、检测电路、驱动电路、输入/输出电路及显示等使用。辅助电源是变频器正常运行的重要保证。

（8）保护和报警　变频器有完善的保护和报警功能，如过载、过电流、过电压、过热及欠电压等保护。

2.2　由变频器组成的模拟主轴

2.2.1　模拟主轴配置

模拟主轴是指数控系统输出 0～+10V 模拟电压给变频器，实现主轴电动机的变频调速控制，通常用于普通型数控机床的主轴控制，如图 2-9a 所示。目前，作为数控机床主轴驱动的变频器有安川变频器、三菱变频器、富士变频器、西门子变频器及其他国产变频器，主轴电动机通常为普通或变频专用三相交流异步电动机。模拟主轴控制时，一方面，CNC 根据输入的 S 代码指令，以及 CNC 设定的主轴传动比等参数，经控制软件计算后输出 0～+10V模拟电压给变频器；另一方面，CNC 对 M03、M04 及 M05 等代码指令进行处理后，通过 CNC 中的 PLC 和外部继电器电路对变频器的输入、输出开关信号进行控制，实现主轴电动机的正、反转和停止等控制。使用模拟主轴控制时，电动机的加、减速等参数需要在变频器上进行设置和调整。图 2-9b 所示为某数控车床采用安川变频器主轴驱动的接线示意图。



a)　　　　b)

图 2-9　模拟主轴

a）组成　b）变频器接线

2.2.2　数控系统与变频器间的控制信号

以图 2-9b 所示的变频器接线为例，数控系统与变频器间的控制信号说明如下。

1. 数控系统到变频器的信号

（1）变频器频率给定电压　数控系统根据主轴倍率以及主轴齿轮档位传动比的设定值，将程序中的主轴转速指令（S 指令）转换成相应的模拟电压（0～+10V），经数控系统模拟输出接口传送到变频器 A1-AC 模拟量电压频率给定端，从而实现对主轴三相交流异步电动机的变频调速控制。

（2）变频器运行开关输入信号　变频器运行开关输入信号来自数控系统 PLC 控制的输出，通常有以下信号：

1）主轴正、反转信号。在数控机床手动操作（JOG）或自动操作（AUTO）方式时实现主轴正转、反转及停止控制。在 JOG 方式下，通过机床操作面板上的正转或反转按钮，经数控系统 PLC 输出控制信号，分别由继电器触点 KA8 或 KA9 接通变频器 S1-SC 端或 S2-SC 端，实现主轴的正、反转起动；按下操作面板上的停止按钮，则 S1-SC 或 S2-SC 断开，电动机减速停车。在 AUTO 方式下，执行 M03 或 M04 指令及 M05 指令，经 PLC 对继电器触点 KA8 或 KA9 进行通、断控制，实现主轴正、反转起动及停止控制。

2）主轴点动信号。系统在 JOG 方式下，通过机床操作面板上的主轴点动按钮，经 PLC 控制使继电器触点 KA7 动作，变频器 S7-SC 端接通，主轴电动机以点动的速度转动，点动频率由变频器参数设定。

3）主轴升、降速信号。变频器 S9-SC 端和 S10-SC 端通过变频器参数分别设定为频率上升和下降控制端。在 JOG 方式下，通过机床操作面板上的主轴升速或降速按钮，使继电

器触点 KA10 或 KA11 动作，变频器输出频率增大或减小，以实现主轴的升速或降速。

4）机床故障信号。当数控机床出现故障时，故障信号通过 PLC 控制使继电器触点 KA13 动作，变频器 S3-SC 端断开使变频器和主轴电动机停止运行。例如：自动加工过程中，进给驱动突然出现故障使进给停止时，进给故障信号经数控系统 PLC 控制使变频器和主轴电动机立即停止运行，从而避免打刀事故的发生。

5）故障复位信号。机床复位信号通过 PLC 控制使继电器触点 KA4 动作，变频器 S4-SC 端使变频器复位。例如：变频器受到干扰出现故障时，可以通过数控系统面板上的复位键（RESET）进行复位，而不用切断电源再重新上电进行复位。

2. 变频器到数控系统的信号

（1）变频器故障信号　当变频器出现故障时，变频器报警输出端 MB-MC 内部常闭触点断开，经外部控制电路将变频器输入电源断开，变频器无电源输出，主轴电动机停止转动。

（2）变频器运行状态开关输出信号　变频器运行状态开关输出信号作为数控系统 PLC 控制的输入，通常有以下信号：

1）主轴速度到达信号。主轴电动机起动且到达设定的转速时，变频器输出端 P2-PC 接通，继电器触点 KA1 经 PLC 控制通知数控系统主轴转速已到达。在自动加工时，主轴速度到达信号可作为切削进给开始的条件，例如：系统在执行 G01、G02 和 G03 等进给切削指令前，要进行主轴速度到达信号的检测，数控系统只有检测到该信号，切削进给才能开始，否则，系统进给指令处于待机状态。

2）主轴零速信号。主轴电动机停止且频率为零时，变频器输出端 P1-PC 接通，继电器触点 KA2 经 PLC 控制通知数控系统主轴已零速停止。主轴零速信号通常作为机床某些动作开始的条件。例如：当数控车床采用液压卡盘时，数控系统检测到主轴转速为零时才能对卡盘进行卡紧或松开的控制；再如：机床主轴采用液压齿轮换档时，在换档前，主轴必须先停止，系统在接收到主轴零速信号后，才能进行换档液压缸的控制。

2.2.3　变频器主要参数设定

1. 控制方式选择

功能码为 A1-02，设定“0”为无编码器的 U/f 控制；“1”为有编码器的 U/f 控制；“2”为无编码器的矢量控制 1；“3”为有编码器的矢量控制；“4”为无编码器的矢量控制 2。变频器用于数控机床主轴控制通常设定为 U/f 控制方式或无编码器的矢量控制方式。

2. 频率给定方式选择

功能码为 b1-01，设定“0”为面板给定，即通过变频器操作面板上的∧（增加键）或∨（减少键）来给定频率；“1”为外部端子给定，即由模拟量电压给定频率；“2”为总线通信给定。若变频器为模拟电压频率给定，则设定为“1”，变频器的输出频率由输入端 A1-AC 的模拟电压（0~+10V）进行控制。

3. 加、减速时间设定

加速时间（功能码 c1-01）表示变频器从 0Hz 到最高运行频率所需的时间，设定过短会引起过电流报警；减速时间（功能码为 c1-02）表示变频器从最高运行频率到 0Hz 所需的时间，设定过短会引起直流母线过电压报警，如图 2-10 所示。

4. 停止方式选择

变频器的停止方式有减速停止、自由停止、直流制动停止等。若变频器为减速停止，则

功能码 b1-03 设定为“0”，即变频器接收到停止命令后，输出频率按减速设定时间降至 0Hz 为止。

5. 电动机热保护动作时间

功能码为 L1-02，设定超过电动机额定电流的热保护动作时间，设定范围为 1~5min。变频器具有电动机过载保护功能，电动机热保护动作时间符合反时限特性，即过载倍数越大，动作时间越短。例如：变频器热保护动作时间设定为 1min，即电动机过载 1.5 倍的保持时间为 1min，若在 1min 内过载未降低，则变频器产生过载报警并跳闸保护。

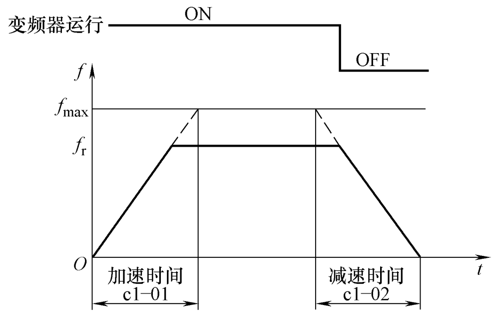


图 2-10　变频器加减速时间

2.3　交流主轴电动机及驱动器

2.3.1　交流主轴电动机

1. 基本结构

交流主轴电动机是一种专用的三相交流异步电动机，需要与主轴驱动器配套使用。与通用的交流异步电动机变频调速相比，交流主轴电动机及驱动器不仅具有更好的加减速性能、更宽的调速范围、更高的调速性能以及低速转矩大的特点，而且可以像伺服驱动一样实现位置闭环控制，以满足数控机床主轴定位、刚性攻螺纹、螺纹加工及 C_s 轴控制等功能。

交流主轴电动机与普通交流异步电动机在结构上无本质区别。图 2-11 所示为西门子 1PH7 交流主轴电动机。

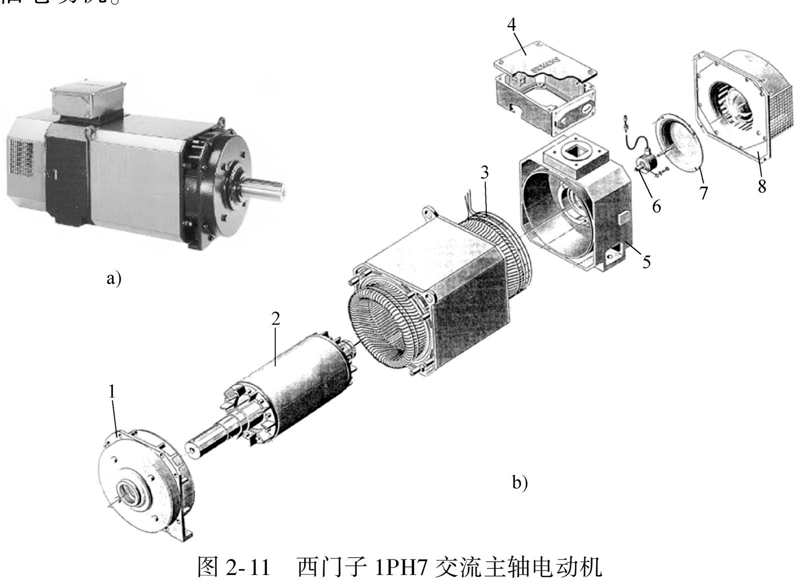


图 2-11　西门子 1PH7 交流主轴电动机

a）外观　b）内部结构及组成

1—前端盖　2—笼型转子　3—定子三相绕组　4—接线盒　5—后端盖　6—编码器　7—编码器端盖　8—风扇及风扇电动机

1PH7 交流主轴电动机是一种强制风冷型异步电动机，通过一个独立安装的风扇进行散热；定子铁心与机座合为一体，定子铁心外形呈多边形，其边缘上有轴向通风孔；定子线圈槽内嵌有三相绕组，定子绕组中埋设有热敏电阻，用于检测电动机的温度，当电动机由于过载或绕组短路引起绕组温度升高到一定值时，热敏电阻阻值发生变化并发送给数控系统，数控系统经判别和处理立即停止有关主轴的控制信号，并发出主轴电动机过热或过载的报警。交流主轴电动机转子与普通三相交流电动机相同，为铸铝转子，转子轴端连接一个编码器，用于检测转子速度和角位移。1PH7 交流主轴电动机与 SIMODRIVE 611 或 S120 系列驱动器配套。

FANUC 交流主轴电动机有 αi 系列和βi 系列，前者为高性能主轴电动机，与 αi 系列驱动器配套；后者为普通主轴电动机，与βi SVSP 系列驱动器配套。图 2-12 所示为 FANUC 交流主轴电动机。

FANUC 交流主轴电动机也是一种强制风冷型异步电动机，FANUC 主轴电动机中的磁电传感器用于转子测速和角位移测量，有 128 脉冲/转、256 脉冲/转、512 脉冲/转三种规格，不带零位置信号（又称一转信号）的为 Mi 系列，带零位置信号的为 MZi 系列。

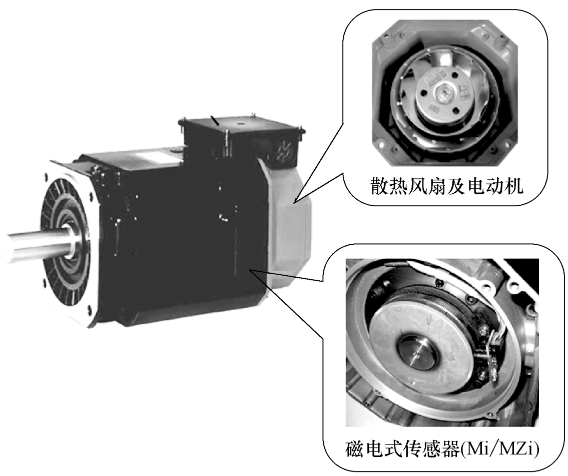


图 2-12　FANUC 交流主轴电动机

2. 工作制

主轴电动机工作过程中，当转速低于额定转速时，电动机工作在恒转矩区，电动机功率随转速增加而正比增加，在额定转速时功率最大；当转速大于额定转速时，电动机工作在恒功率区，电动机转矩随转速增加而反比减少，主轴电动机的输出功率决定了机床的切削能力，由此希望主轴电动机的恒功率调速范围尽可能的大。另外，交流主轴电动机的过载能力较强，对于大多数的切削加工，某一刀具的实际加工过程往往是按一定周期进行的，包括切削、空载及停止等，主轴电动机通常按 S1、S3 或 S6 工作制进行选择。

1）S1 连续工作制。在电动机温升不超过允许温升的条件下，电动机能长期工作的区域称为连续工作区。

2）S3 断续周期工作制。按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段停止时间，在每一周期中，电动机温升不超过允许温升。通常负载持续率为 15%、25%、

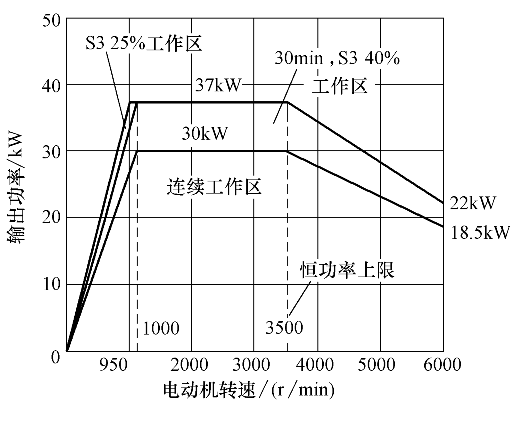


图 2-13　FANUCαiI30/6000 主轴电动机在 S1 和 S3 工作制下的输出特性

40%和 60%，例如：“30min，S3 40%”表示运行周期为 30min，负载运行时间为 12min，停止时间为 18min。

3）S6 连续周期工作制。按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段空载运行时间，无停止时间。例如：“10min，S6 40%”表示运行周期为10min，负载运行时间为 4min，空载运行时间为 6min。

图 2-13 所示为 FANUC αiI30/6000 主轴电动机在 S1 和 S3 工作制下的输出特性。

2. 3. 2　交流主轴电动机驱动器

用于交流主轴电动机的驱动器是一种矢量控制方式的变频器，其主电路和控制电路与一般的变频器无本质的区别，但与数控系统之间的控制信号采用数字式的总线控制，一方面，驱动器的运行参数，如加减速时间等在数控系统上进行设定；另一方面，数控系统可以对主轴驱动运行状况进行监控，如主轴电动机转速、负载率、电动机电流，以及各种报警等。

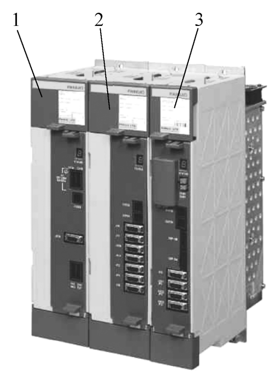


图 2-14　FANUC αi 系列驱动器

1—电源模块（PSM）

2—主轴模块（SPM）

3—伺服模块（SVM）

1. FANUC αi 系列驱动器

FANUC αi 系列驱动器由电源模块（PSM）、主轴模块（SPM）和伺服模块（SVM）组成，与 αi 系列主轴电动机和伺服电动机配套，通常应用于 FANUC 16i/18i/21i/0iC/0iD 等数控系统，如图 2-14所示。其中，主轴模块因为与数控系统进行串行通信，所以又称串行主轴放大器，由此构成的主轴驱动称为串行主轴。图 2-15所示为 FANUC αi 系列驱动器中的电源模块和主轴模块接线。

αi 系列驱动器是一种直流共母线、矢量控制的变频器，从主电路角度看，电源模块包含有整流和滤波部分，将输入的三相交流电转换成直流母线电压，主轴模块和伺服模块各包含逆变部分，共用直流母线电压，经逆变生成主轴电动机和伺服电动机驱动电源。

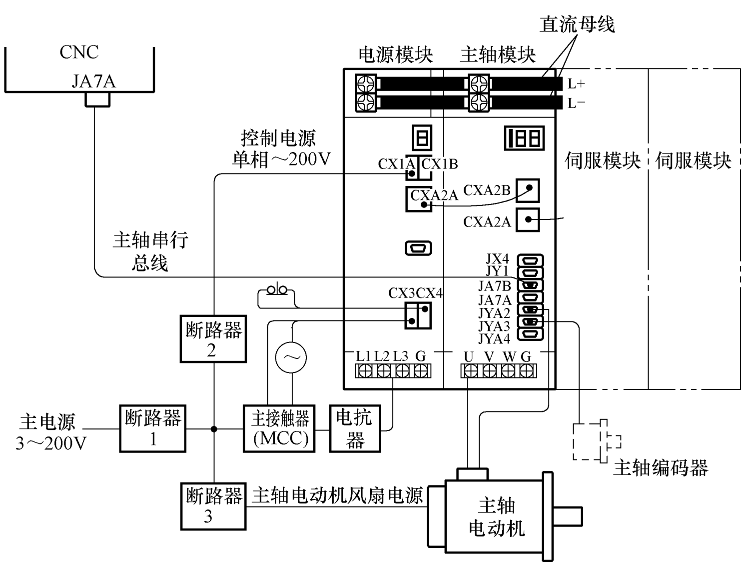


图 2-15　FANUC αi 系列驱动器中的电源模块和主轴模块接线

（1）电源模块　电源模块由主电路板和控制电路板组成，控制电路板可以从主电路板中拔出和插入。主电路板包括整流、滤波电路，以生成直流母线电压；控制电路除了对直流母线进行监控外，还进行急停控制等。另外，电源模块中还有辅助电源，生成+5V、+15V及+24V 控制电源，供内部控制电路用。电源模块有三种类型：①PSM 电源模块，该模块输入电源为三相交流 200~240V，直流母线电压为 300V，电网回馈制动方式；②PSMR 电源模块，该模块输入电源为三相交流 200~240V，直流母线电压为 300V，能耗制动电阻制动方式；③PSM-HV 电源模块，该模块输入电源为三相交流 400~480V，直流母线电压为 600V，电网回馈制动方式。

电源模块上的接口说明：

L1、L2、L3、G：电源模块三相交流电源进线端。

L+、L-：直流母线电压“+”“-”端。

CX1A：单相交流 200V 输入，经内部辅助开关电源得到+5V、+15V 及+24V 控制电源，其中：+5V、+15V 供电源模块内部电路使用，+24V 为电源模块内置冷却风扇提供电源外，另由 CXA2A 口输出。

CX1B：单相交流 200V 输出，为大容量的电源模块、主轴模块配置的散热器冷却风扇提供电源。

CXA2A：除了为主轴模块和伺服模块提供+24V 电源外，还有模块之间串行信息和急停信号传递。

JX1B：该接口功能封闭。

CX3：电源模块三相交流主电源接触器（MCC）控制信号接口。

CX4：急停信号接口。

电源模块上有一个状态显示窗口，显示“—”表示电源模块启动未就绪；显示“0”表示电源模块已准备好；显示代码，表示电源模块有故障。

αi 系列驱动器在正常工作情况下，其电源模块上的 CX3 端内部触点闭合，主电源接触器（MCC）线圈得电，MCC 触点闭合，主电源线路接通。当 CX4 端有急停信号（＊ESP）输入时，如急停按钮、工作台限位开关等，内部控制电路使 CX3 内部继电器断开，主电源接触器（MCC）失电，主电源线路断开，电源模块断电，主轴电动机和伺服电动机均停止。

（2）主轴模块　主轴模块由主电路板和控制电路板组成，控制电路板可从主电路板中拔出和插入。主电路板包括 IPM 逆变电路；控制电路板通过与数控系统的串行通信，以及主轴电动机上的磁电传感器或主轴编码器的反馈信号，经矢量变换运算，最后控制 IPM 的导通或截止，生成三相交流电供主轴电动机实现变频调速。另外，控制电路板还有温度、电流及电压等检测电路，用于状态监控和报警。

主轴模块上的接口说明：

U、V、W、G：主轴电动机动力线连接端。

CXA2A：除接收电源提供的+24V 电源外，还有模块之间串行信息和急停信号传递。

CXA2B：除为后续模块提供的+24V 电源外，还有模块之间串行信息和急停信号传递。

JX4：主轴伺服信号检测板接口。通过主轴模块状态检测板可获取主轴电动机磁电传感器和主轴编码器的信号。

JY1：外接主轴负载表接口和速度表接口。

JA7B：串行主轴输入信号接口，与 CNC 系统的 JA7A 接口连接。

JA7A：连接第 2 串行主轴信号输出接口。

JYA2：连接主轴电动机内置磁电传感器和温度传感器信号接口。

JYA3：主轴一转位置信号或主轴独立编码器连接接口。

JYA4：主轴 C_s 轴传感器信号接口（选择配置）。

主轴功率模块上有状态显示窗口，指示主轴的运行状态和报警，LED 显示“——”且闪烁时，表示等待 CNC 串行通信以及参数装载；显示“——”时，表示参数装载完成，但主轴电动机尚未激活；显示“00”时，表示主轴驱动已准备好，主轴电动机已激活，可以进行正常运行；若显示报警代码，表示主轴故障或错误信息。

2. FANUC βi SVSP 驱动器

FANUC βi SVSP 驱动器相当于将 αi 系列驱动器中的电源模块、主轴模块及伺服模块集成在一起，是一种主轴/伺服一体化的驱动器，如图 2-16 所示。其面板上的接口定义和功能与 αi 系列放大器基本一致。βi SVSP 驱动器内置的整流和滤波电路生成的直流母线电压同时供主轴驱动逆变和伺服驱动逆变，主轴和伺服均采用矢量控制，主轴及伺服电动机采用回馈制动方式。

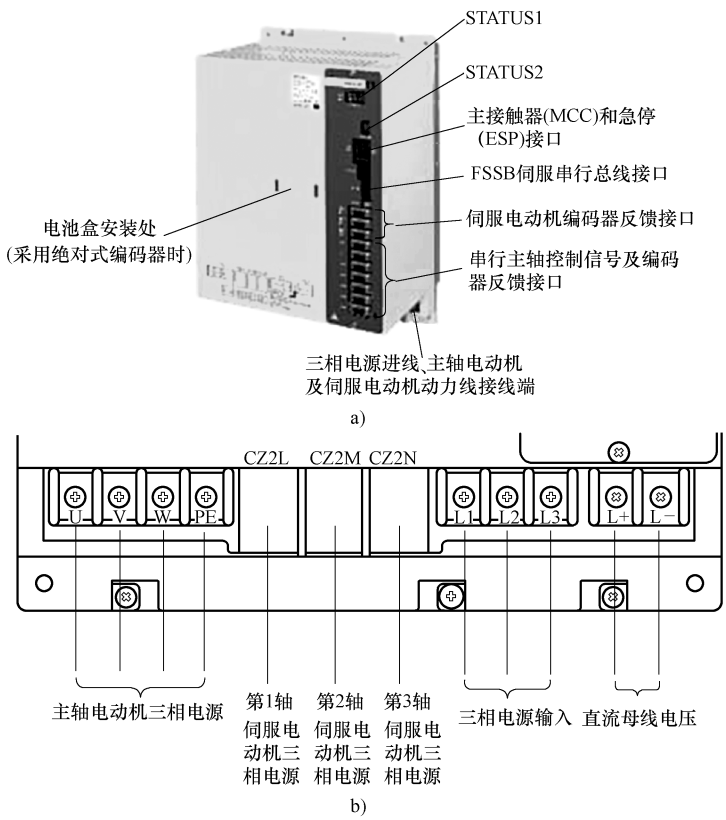


图 2-16　FANUC βi 系列 SVSP 驱动器

a）外观　b）电源端子

βi SVSP 驱动器与 βi 系列主轴电动机和伺服电动机配套使用，一个 βi SVSP 驱动器可配置一个主轴和两个伺服轴，组成数控车床主轴和进给驱动；或者配置一个主轴和三个伺服

轴，组成数控铣床主轴和进给驱动。

βi SVSP 驱动器与数控系统有两条控制总线，一是主轴串行总线，用于主轴电动机控制；二是伺服串行总线（FSSB），用于伺服电动机控制。βi SVSP 放大器有三路反馈信号，一是伺服电动机编码器及温度反馈信号；二是主轴电动机编码器及温度反馈信号；三是主轴编码器或一转接近开关反馈信号。

βi SVSP 放大器上有两个 LED 数码指示窗口，其中，STATUS1 是有关电源和主轴的运行状态和报警指示，STATUS2 是有关伺服驱动的运行状态和报警指示。

2.3.3 FANUC 串行主轴配置

FANUC 数控系统与 αi 系列放大器或 βi SVSP 放大器组成主轴控制时，两者之间通过主轴串行总线进行通信，CNC 与驱动器之间传送数字信号，包括 M、S 代码指令信号及位置和速度等反馈等信号；主轴驱动有关参数的设置和调整在 CNC 上进行，主轴正、反转及停止等控制由 CNC 与 PMC 内部接口信号进行控制。串行主轴用于高性能数控机床的主轴控制，除了常规的速度和正反转控制外，还可进行主轴准停、定位、刚性攻螺纹及 C_s 轴等控制。根据主轴实现的功能不同，FANUC 主轴电动机与主轴放大器有不同的配置方式。

1. 主轴电动机内装磁传感器

利用主轴电动机内装的 MZi 磁电式传感器（带一转信号）发出的主轴速度、主轴位置及主轴一转信号实现主轴准停、刚性攻螺纹、车螺纹及 C_s 轴控制等。这种方式适用于主轴电动机与主轴直联或 1∶1 的传动场合，如图 2-17 所示。

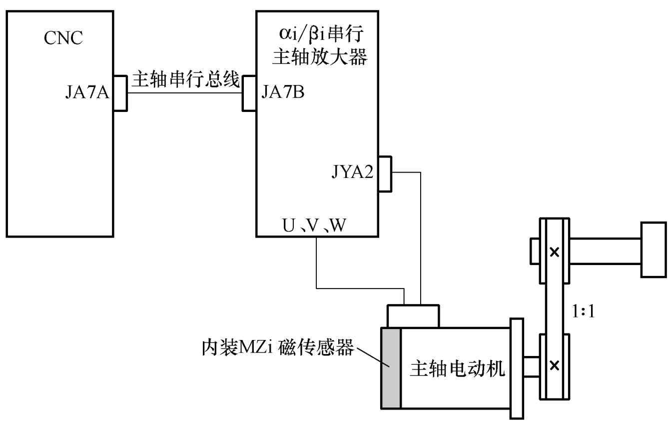


图 2-17　主轴电动机内装磁传感器（MZi）的配置

2. 主轴外接独立编码器

主轴编码器通常用同步齿形带与主轴 1∶1 连接，主轴编码器为带一转信号的增量式编码器，主轴电动机内装 Mi 磁传感器（不带一转信号），利用主轴编码器发出的主轴速度、主轴位置及主轴一转信号实现主轴准停、刚性攻螺纹、车螺纹及 C_s 轴轮廓控制等。这种方式适用于主轴电动机与主轴之间有机械传动（皮带或齿轮）的场合，如图 2-18 所示。

3. 主轴外接接近开关

主轴上有感应盘，与接近开关相对应，主轴电动机内装 Mi 磁传感器（不带一转信号），利用接近开关发出的一转信号和主轴电动机内装 Mi 磁传感器发出的主轴速度信号和位置信号实现主轴准停、刚性攻螺纹控制等。这种方式适用于主轴电动机与主轴之间有机械传动（皮带或齿轮）的场合，如图 2-19 所示。

上述各种主轴配置方式需通过数控系统设定有关参数来确定，请读者参考 FANUC 系统有关参数的说明书。

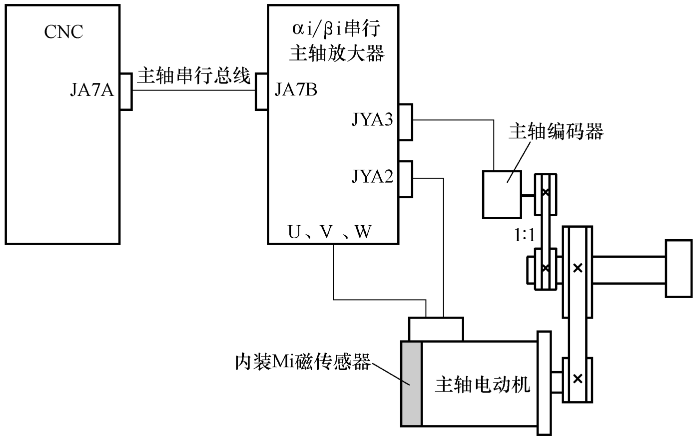


图 2-18　主轴外接独立编码器

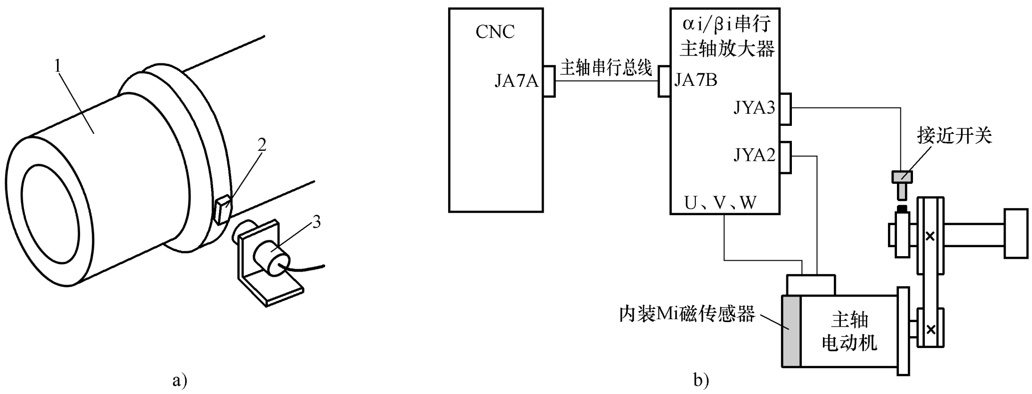


图 2-19　主轴外接接近开关

a）主轴接近开关　b）配置

1—主轴　2—感应块　3—接近开关

2.3.4　电主轴

电主轴是一种将电动机与高精度主轴结合在一起的装置。电主轴中，电动机转子直接作为机床主轴，省却了主轴机械传动环节，提高了主轴传动精度，降低了噪声和振动，在高速和高精度数控机床中得到了广泛应用。图 2-20 所示为电主轴在 5 轴联动数控机床中的应用。

图 2-21a～c 所示分别为电主轴的外观、内部结构及与外部连接的线路和管路。

电主轴由变频器驱动，最高转速可达 100000r/min 以上；电主轴内部有冷却管道，通过外部的热交换器对电动机进行循环冷却；主轴轴承采用气雾润滑的方式，通过压缩空气将润滑油定时、定量地打到主轴轴承上；电主轴中安装

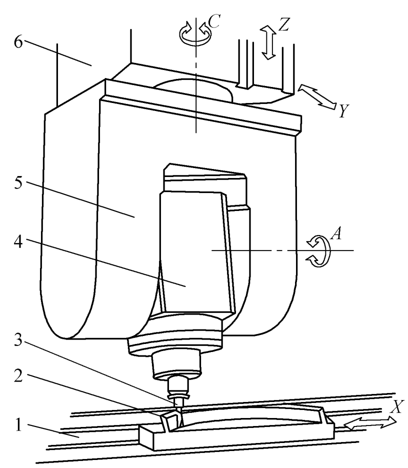


图 2-20　电主轴在 5 轴联动数控机床中的应用

1—工作台　2—工件　3—刀具　4—电主轴　5—支架　6—升降座

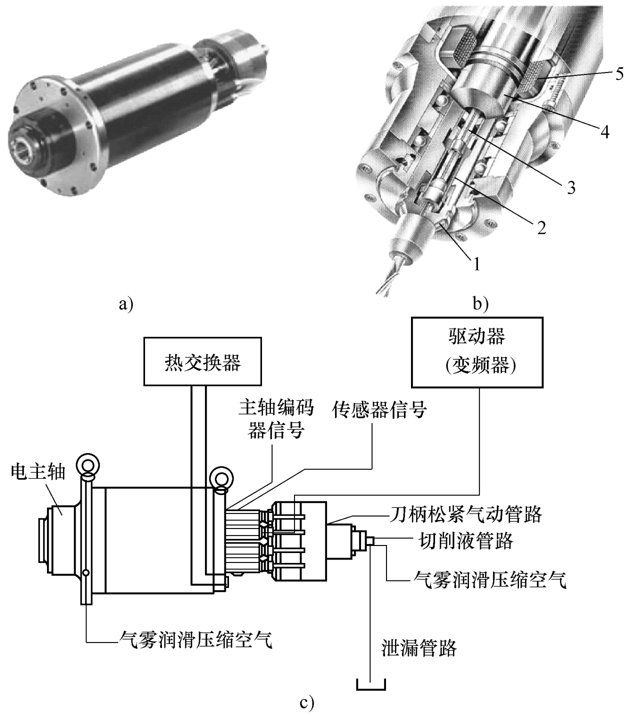


图 2-21 电主轴

a）外观 b）内部结构 c）与外部连接的线路和管路

1—刀柄 2—卡爪 3—拉杆 4—电主轴转子 5—电主轴定子绕组

有编码器，用于检测主轴速度和位置；电主轴中还安装有温度传感器，用于检测电动机温度，有的电主轴中还安装有轴向位移传感器，对主轴热变形产生的轴向位移进行检测，由数控系统进行补偿；电主轴后端有松紧刀气缸，通过拉杆、碟形弹簧和卡爪对刀柄进行夹紧和松开。为了适应主轴旋转的需要，电主轴中刀柄采用 1∶10 中空短锥柄，如 HSK 刀柄等。刀柄夹紧时，刀柄锥面与主轴锥孔、法兰端面与主轴端面配合实现双重定位，具有结合刚度高、重复定位精度高及高速锁紧性好等特点。

2.4 主轴伺服功能

数控机床主轴除了基本的速度控制外，还有位置控制，如主轴准停（定向）、主轴定位、螺纹车削、刚性攻螺纹及 C_s轴等控制方式。

2.4.1 主轴准停

主轴准停又称主轴定向，指令代码为 M19。与一般的主轴停止（M05）不同，主轴准停时，主轴必须停在规定的位置，同时主轴电动机保持转矩，以保持主轴在准停位置静止并抵御主轴外部负载的扰动。主轴准停用于以下场合：加工中心换刀时主轴定向，以便主轴端面键插入刀柄键槽中，如图 2-20a 所示；精镗退刀时主轴先定向准停，经径向偏移一小段距离 Δ 后，再轴向退刀，以避免刀具划伤已加工好的表面，如图 2-22b 所示。

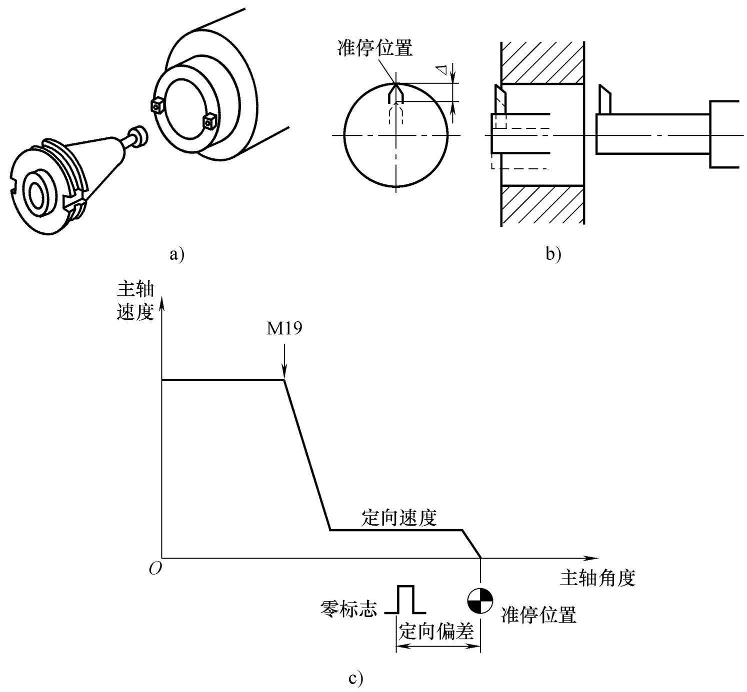


图 2-22　主轴准停
a）加工中心换刀　b）精镗退刀　c）主轴准停控制

早期数控机床主轴采用机械准停的方式，现代数控机床多采用电气准停的方式。要实现主轴电气定向控制，需要有一转信号的支持。一转信号的获得根据主轴配置的不同有三种方式，一是主轴电动机安装有带一转信号的编码器；二是主轴编码器一转信号；三是主轴外部一转信号（接近开关）。在图 2-22c 所示的主轴准停控制中，当数控系统执行 M19 指令时，主轴先减速到定向速度（数控系统参数设定），在系统接收到零标志信号后，主轴再转过一个偏差量（数控系统参数设定）后停止，停止位置即为主轴准停位置。调整定向偏差值，可修正主轴准停位置。

2.4.2　主轴定位

在全功能数控车床中，主轴可实现定角度的定位，如 45°、90°和 135°，主轴定位功能配合动力刀架可实现零件的钻削和铣削等加工，如图 2-23 所示。

在图 2-23 所示的加工过程中，当工件外圆柱面切削完成后，转塔刀架上的自驱刀头转位到加工位置，同时主轴定位，自驱刀头对工件进行钻孔加工。

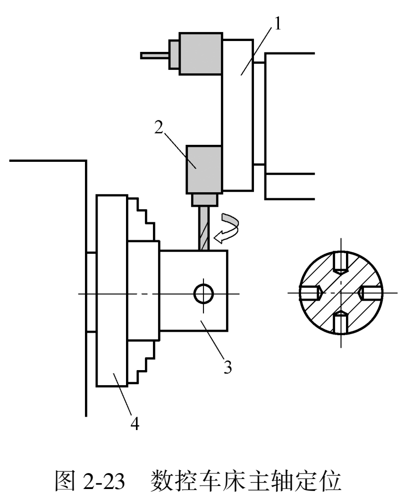


图 2-23　数控车床主轴定位
1—转塔刀架　2—自驱刀头　3—工件　4—卡盘

2.4.3 螺纹车削

在螺纹车削加工程序中，F 指令设定值为螺纹螺距。在螺纹车削过程中，数控系统根据主轴速度 S 指令和螺距，计算出 Z 轴进给速度 f_Z，f_Z 必须满足

$$f_Z = 螺纹螺距 \times 主轴速度$$

在一般的螺纹车削中，因为刀具从起点向 Z 向进给时，刀具从静止到稳定的进给速度有一个加速过程，所以编程时要设定一段起刀距离用于加速，当刀具切入工件时，主轴转速和 Z 向进给速度都保持了稳定，这样就保证了最初几牙螺纹螺距的准确性，如图 2-24a 所示。

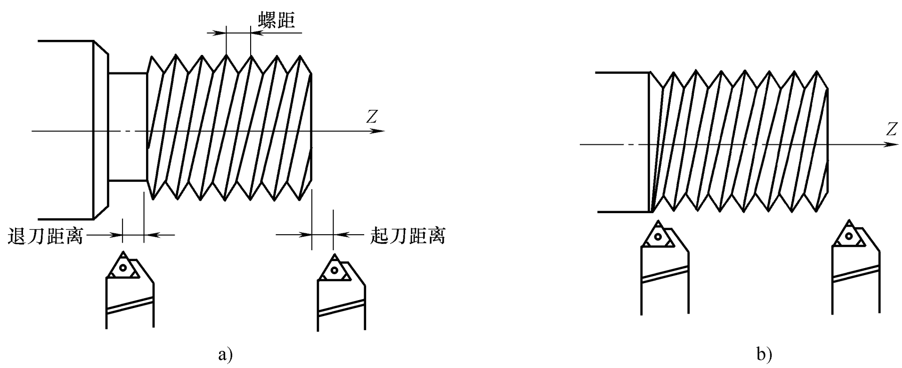


图 2-24　螺纹车削

a）有退刀槽的螺纹车削　b）刚性螺纹车削

螺纹车削完成时，刀具从稳定的进给速度到停止有一个减速过程，编程时要设定一段退刀距离，使刀具在切出螺纹时再开始减速，以保证最后几牙螺纹螺距的准确性，通常零件上设计有螺纹切削退刀槽。

还有一种专门用于没有退刀槽的螺纹切削控制，如图 2-24b 所示。刀具在 Z 向螺纹切削完成减速阶段，数控系统根据检测到的 Z 向进给速度，自动降低主轴转速，并保持主轴转速与 Z 向进给速度成线性比例关系，以保证螺距的准确性和一致性。

2.4.4 刚性攻螺纹

在加工中心攻螺纹加工中，主轴速度与 Z 轴进给速度 f_Z 必须满足

$$f_Z = 丝锥螺距 \times 主轴速度$$

以普通方式进行攻丝循环加工时，由于主轴和 Z 轴进给加减速特性不一致，攻螺纹时丝锥上必须配用弹簧夹头，以此来补偿 Z 轴进给与主轴不同步产生的螺距误差，带弹簧夹头的丝锥刀柄如图 2-25a 所示。用这种方式攻螺纹时，当丝锥旋转到底且 Z 轴停止时，主轴并没有立即停止，弹簧夹头被压缩一段距离；当丝锥沿 Z 轴反向旋转退出时，主轴加速，弹簧夹头又被拉伸。普通方式攻螺纹循环只能满足一般精度螺纹孔的加工；另外，若攻螺纹时主轴速度越高，则弹簧夹头的伸缩范围也必须足够大，所以用这种方式攻螺纹时主轴速度

只能限制在 600r/min 以下。

刚性攻螺纹又称同步进给攻螺纹，刚性攻螺纹不需要弹簧夹头，刚性丝锥刀柄如图 2-25b所示。刚性攻螺纹时，主轴转速与 Z 轴进给速度建立起同步关系，这样就严格保证了主轴转速与 Z 轴进给速度呈线性比例关系，如图 2-26 所示。

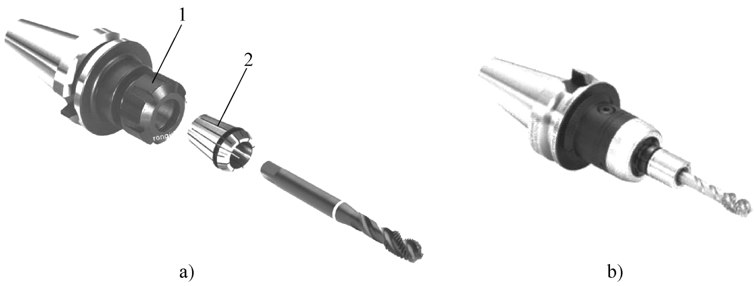


图 2-25　丝锥刀柄

a）带弹簧夹头的丝锥刀柄　b）刚性丝锥刀柄

1—夹头体　2—弹簧夹头

用刚性攻螺纹加工螺纹孔时，当 Z 轴攻螺纹到达指令位置时，主轴转动与 Z 轴进给同步减速并同时停止；主轴反转起动加速与 Z 轴反向进给起动加速同样也保持同步。另外，刚性攻螺纹时，在丝锥强度允许的情况下主轴转速可以很高，可达 4000r/min ，加工效率得到显著提高，且螺纹精度得到保证。

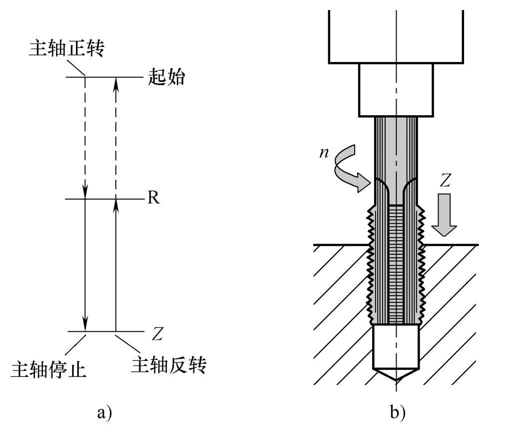


图 2-26　刚性攻螺纹

a）攻螺纹固定循环　b）主轴转速与 Z 向进给速度同步

2.4.5　C_s轴控制

C_s轴控制是全功能数控车床主轴控制功能之一。在 C_s轴控制方式中，主轴作为一根伺服轴（因绕 Z 轴回转，故定义为 C_s轴）进行位置控制。一方面，主轴可以任意角度定位；另一方面，主轴可与 Z 轴或 X 轴一起联动插补，加工出轮廓曲线。图 2-27 所示为在数控车床上进行圆柱凸轮加工。

以 FANUC 串行主轴为例，配置自驱力头的刀架沿 Z 轴与 C_s轴联动插补，由自驱力头上的铣刀加工圆柱凸轮。要实现 C_s轴控制，主轴上要安装编码器来进行位置检测，如 BZi/CZi 高分辨率编码器，其中，BZi 的精度为 0.015°～0.03°，CZi 编码器的精度为 0.005°。图 2-27b 中，编码器检测环固定在主轴上，随主轴一起旋转，传感器固定在主轴箱上，检测环与传感器之间保持一定的间隙。检测环圆周上均布有齿，每转过一个齿，相当于主轴转过一个分辨角，传感器即产生一个脉冲，通过对脉冲进行计数，即可得到主轴转过的角度。

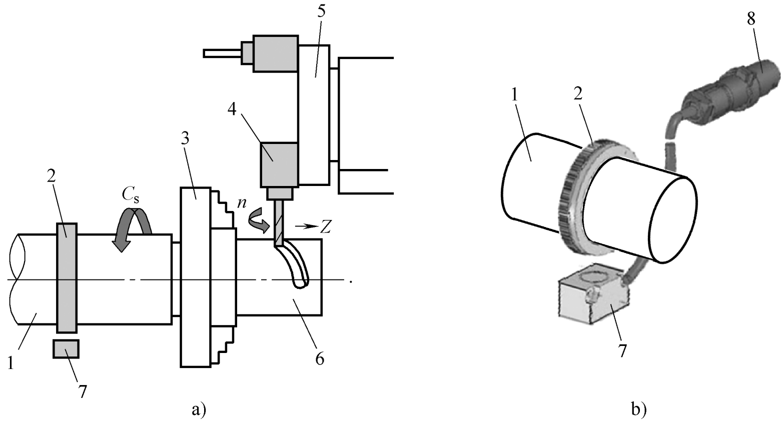


图 2-27　C_s轴用于圆柱凸轮加工

a）安装在主轴上的编码器　b）BZi/CZi 传感器

1—主轴　2—检测环　3—卡盘　4—自驱刀头　5—刀架　6—工件　7—传感器　8—电缆连接插座

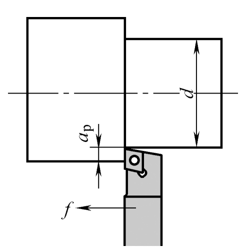
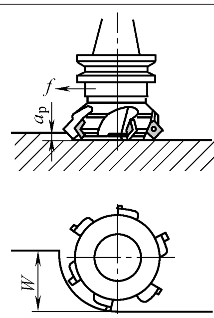
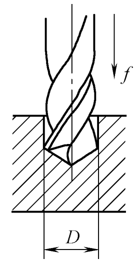
2.5　主轴电动机的选择

主轴电动机的输出功率是由机床切削能力决定的，切削能力根据工件材料、刀具，针对车、铣和钻孔等典型加工进行标定。

2.5.1　切削能力的计算

切削能力以单位时间（每分钟）能够切削的金属材料的体积 Q(cm^3/min）来衡量。车削、铣削和钻孔的切削能力见表 2-1。

表 2-1　车削、铣削和钻孔的切削能力

切削类型	车削	铣削	钻孔
简图			
每分钟切削体积 Q /(cm^3/min)	$Q=\frac{\pi d f a_P}{1000}$	$Q=\frac{W f a_P}{1000}$	$Q=\frac{\pi(D/2)^2 f}{1000}$
参数说明	d——工件平均直径(mm) f——切削进给速度(mm/min) a_P——背吃刀量(mm)	W——铣削宽度(mm) f——切削进给速度(mm/min) a_P——背吃刀量(mm)	D——钻孔直径(mm) f——切削进给速度(mm/min)

2.5.2　主轴功率计算

确定切削能力 Q 后，针对不同的加工方式、加工材料及刀具材料，确定主轴功率 P，即

$$P \geqslant \frac{Q}{\eta M_r}$$

式中　η——主轴的机械传动效率，见表 2-2；

M_r——单位功率切削效率（$cm^3/min/kW$），见表 2-3。

表 2-2　主轴的机械传动效率

传动类型	同步带	单级齿轮	多级齿轮
效率 η	0.95~0.97	0.9~0.95	0.8~0.88

表 2-3　单位功率切削效率

切削条件与工件材质	硬度	单位功率切削效率 M_r/(cm^3/min/kW)					
		车削		铣削		钻削	
切削用量	—	每转 0.12~0.38mm		每齿 0.12~0.3mm		每转 0.05~0.3mm	
刀具材料	—	高速钢或硬质合金		硬质合金		高速钢	
刀具形式	—	锋利	钝化	锋利	钝化	锋利	钝化
碳素钢 合金结构钢 工具钢	HBW 85~200	25	19.6	25	19.6	27.4	21
	HRC35~40	19.6	16.1	18.2	14.4	19.6	16.1
	HRC40~50	18.2	14.4	15.2	12.5	16.1	13
	HRC50~55	13.6	10.9	13	10.5	13	10.5
	HRC55~58	8	6.5	10.5	8.5	10.5	8.5
铸铁	HBW 110~190	39.1	30.5	45.7	34.2	27.4	22.9
	HBW 190~320	19.6	16.1	25	19.6	17.1	13.6
不锈钢	HBW 135~275	21	17.1	19.6	16.1	25	19.6
	HRC30~45	19.6	16.1	18.2	14.4	22.9	18.2
铝合金	HBW 30~150	110	91.5	85.7	68.6	171.5	137.2

【例 2-1】　某数控车床主轴采用多级齿轮传动，传动比为 1∶6，拟采用 FANUC βiI 标准型主轴电动机。要求利用高速钢刀具对硬度为 HBW180、直径 $d=100$mm 的工件进行单边 $a_p=3$mm 的切削。βiI 标准型主轴电动机规格见表 2-4 所示。

表 2-4　βiI 标准型主轴电动机规格

电动机型号	输出功率/kW		转速/(r/min)			转子惯量/kg·m^2	堵转转矩/N·m
	连续	15min,25%	额定	恒功率上限	最高		
βiI3/10000	3.7	5.5	2000	4500	10000	0.0078	17.7
βiI6/10000	5.5	7.5	2000	4500	10000	0.0148	26.3
βiI8/10000	7.5	11	2000	4500	10000	0.0179	35.8
βiI12/10000	11	15	2000	3500	8000	0.0275	52.5
βiI15/10000	15	18.5	2000	3500	7000	0.07	71.7

根据金属切削手册提供的切削数据，高速钢切削硬度为 HBW180 的钢件，切削速度可取 $v_c=30\mathrm{m/min}$，进给量 $f_r=0.3\mathrm{mm/r}$，则切削参数为

主轴转速：$n=\dfrac{v_c}{\pi d}=\dfrac{30\times1000}{\pi\times100}\mathrm{r/min}=95.5\mathrm{r/min}$

进给速度：$f=f_r n=0.3\mathrm{mm/r}\times95.5\mathrm{r/min}=28.7\mathrm{mm/min}$

车削能力：$Q=\dfrac{\pi d f a_p}{1000}=\dfrac{\pi\times100\times28.7\times3}{1000}\mathrm{cm^3/min}=27.0\ \mathrm{cm^3/min}$

查表 2-2 得 $\eta=0.8$；查表 2-3 得 $M_r=25\mathrm{cm^3/min/kW}$，则主轴功率：

$$P\geqslant\frac{Q}{\eta M_r}=\frac{27.0}{0.8\times25}\mathrm{kW}=1.35\mathrm{kW}$$

因为传动比 $i=6$，则主轴电动机转速 $n_M=95\mathrm{r/min}\times6=570\mathrm{r/min}$，βiI 标准型主轴电动机的额定转速 $n_{Mn}=2000\mathrm{r/min}$，根据额定转速以下恒转矩调速的特性，电动机输出功率与转速成正比，故电动机额定功率 P_{MN} 为

$$P_{MN}\geqslant\frac{2000\mathrm{r/min}}{573\mathrm{r/min}}\times1.35\mathrm{kW}=4.7\mathrm{kW}$$

参考表 2-4，选择 βiI6/10000 主轴电动机，额定转速为 2000r/min，输出功率为 5.5/7.5kW。

思考题与习题

1. 填充题

（1）数控机床交流主轴电动机通常为____________，用________进行调速。为改善低频时的散热问题，变频专用电动机末端安装有________，并独立供电。

（2）电压型交-直-交变频器主电路由________、________和________等组成。

（3）变频器 SPWM 的作用是________________，逆变功率模块通常为________和________。

（4）变频器的控制方式有______和______等，前者通常为速度开环，用于对速度控制要求不高的场合；后者为速度闭环，有________和________两种形式，用于对速度控制要求高的场合。

（5）主轴电动机在变频减速时，电动机处于________状态，造成变频器______电压上升。基于这一现象，变频器的制动有________和________两种方式，前者需配置__________；后者通过______将________回馈给电网。

（6）FANUC αi 系列驱动器是一种__________变频器，由①________、②________和③________组成。其中，①的作用是，一方面将三相 200V 交流电转换成________母线电压，另一方面生成+5V、+15V 和________控制电源；②的作用是____________，其控制面板上的相关接口通过________与 CNC 连接，进行数字通信，并接收主轴电动机中________的反馈信号；③的作用是____________，其控制面板上的相关接口通过__________与

CNC 连接，进行数字通信，同时与伺服电动机中的串行编码器连接。

2. 简答题

（1）说明三相交流异步电动机“异步”的概念。

（2）变频调速的本质是什么？

（3）说明 *U/f* 变频调速和矢量变频调速的特点。

（4）说明电压型交-直-交变频器“交-直-交”的含义。

（5）说明变频器能耗制动和回馈制动的区别。

（6）加减速时间设置长短对变频器运行有什么影响？

（7）说明模拟主轴和数字主轴的区别。

（8）主轴刚性攻螺纹的特点是什么？

（9）数控机床伺服主轴有什么功能？

3. 计算分析题

（1）图 2-28 所示为某数控机床主轴电动机功率图。求：

1）主轴电动机连续运行时的额定转速和最高转速。

2）主轴电动机连续运行时的额定功率和最小功率。

3）主轴电动机连续运行时额定转速下的转矩。

4）主轴电动机连续运行时最高转速下的转矩。

5）主轴电动机连续运行时电动机的最低转速。

6）主轴电动机转速为 500r/min 时的转矩和功率。

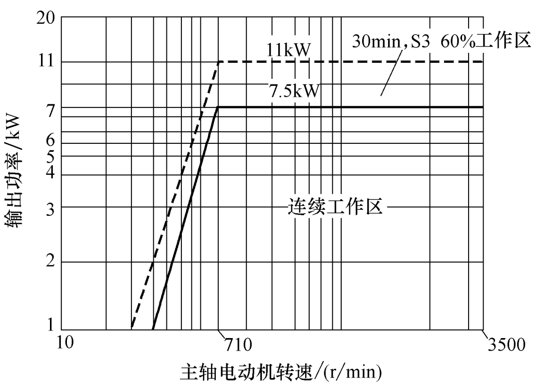
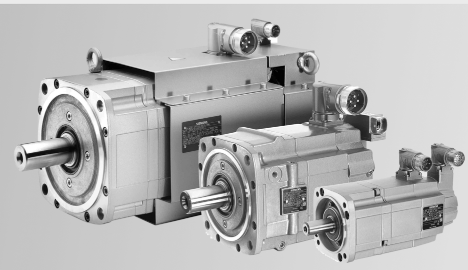


图 2-28　计算分析题（1）图

7）主轴电动机与主轴通过皮带传动（图 1-13），电动机带轮直径为 ϕ125mm，主轴带轮直径为 ϕ172mm。主轴电动机额定转速时主轴的转速及转矩。

提示：功率公式 $P=\frac{Tn}{9550}$，其中，*P* 为功率（kW）、*T* 为转矩（N・m）、*n* 为转速（r/min）。

（2）某加工中心要求利用高速钢刀具对硬度为 HBW180 的铸件进行直径为 25mm 的钻孔加工，切削速度取 21mm/min，主轴进给量为 0.3mm/r。机床主轴采用 1∶1 同步带传动，传动效率为 0.95，请选择额定转速（2000r/min）时的主轴电动机功率。



第 3 章 伺服电动机及驱动

在数控机床进给伺服系统中，伺服电动机带动滚珠丝杠实现进给传动，伺服驱动器接收数控系统的控制信号，经功率放大为伺服电动机提供电源，使伺服电动机输出转矩、转速和角位移。伺服电动机及驱动是数控机床伺服系统中速度环和电流环的主要组成部分，其性能直接影响到数控机床进给运行的稳定性、准确性和快速性。

3.1　交流伺服电动机及驱动器

3.1.1　交流伺服电动机

1. 基本结构及工作原理

数控机床伺服电动机经历了从早期的直流伺服电动机、无刷直流电动机，到现在的三相交流正弦波永磁同步电动机各发展阶段，当前数控机床中广泛使用的交流伺服电动机通常是指三相交流正弦波永磁同步电动机（英文缩写为 PMSM）。交流伺服电动机是一种采用永磁体励磁的多相同步电动机，定子结构与三相交流异步电动机基本相同，转子结构根据转子铁心与永磁体的组合方式，有表面式（凸装式）、嵌入式和内置式三种基本形式，如图 3-1 所示。

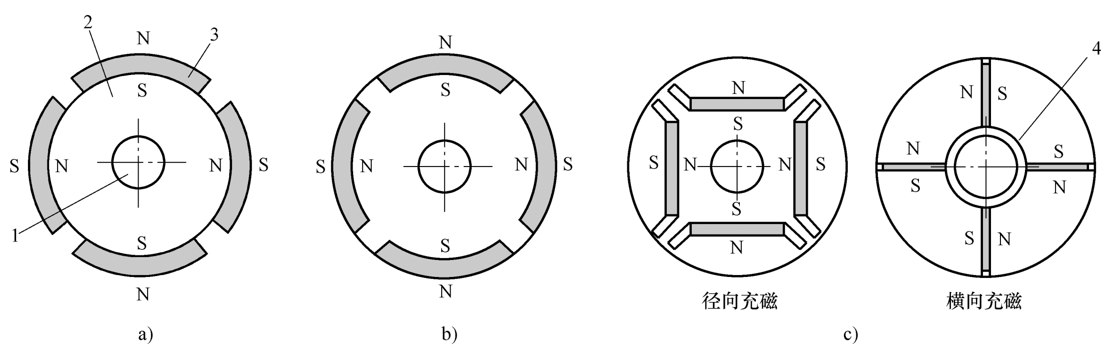


图 3-1　转子永磁体结构

a）表面式　b）嵌入式　c）内置式

1—转轴　2—转子铁心　3—永磁体　4—隔磁衬套

表面式转子中，永磁体呈瓦片状，通过环氧树脂直接粘贴在转子铁心表面；嵌入式转子

中，永磁体嵌装在转子铁心表面的槽中；内置式转子中，永磁体位于转子铁心内部，按永磁体安置的部位，有径向充磁和横向充磁等形式。图 3-2 所示为 FANUC 交流伺服电动机。

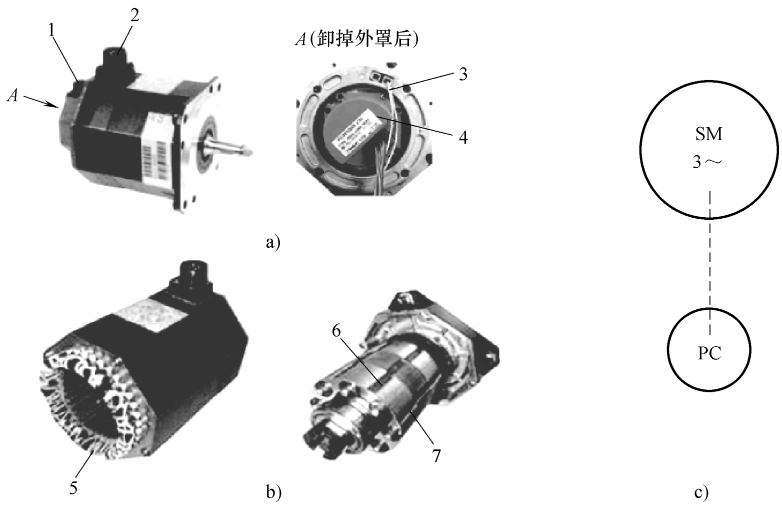


图 3-2　FANUC 交流伺服电动机

a）外观　b）定子和转子　c）符号

1—编码器接线座（含热敏电阻接线）　2—三相电源接线座　3—热敏电阻电缆

4—编码器　5—定子三相绕组　6—永久磁铁　7—转子铁心

交流伺服电动机定子无机座，定子铁心由硅钢片叠装而成，定子外形呈多边形；定子铁心线圈槽内嵌有三相对称绕组，通入三相交流电源。定子绕组中埋设有热敏电阻，对电动机温度进行检测，实现过载和过电流保护；伺服电动机通常采用自然冷却方式。交流伺服电动机转子由转子铁心和永久磁铁组成，转子铁心由硅钢片叠装而成，永久磁铁为钕铁硼等永磁材料，采用内置式结构。另外，交流伺服电动机转子同轴连接编码器或旋转变压器，用于检测伺服电动机转子磁极位置、转速和角位移。

交流伺服电动机定子绕组通入三相交流电后，产生转速为 n_0 的旋转磁场，该旋转磁场与转子上的永久磁铁产生的磁场相互吸引，旋转磁场就带动转子旋转起来，转子转速与旋转磁场转速一致。因为定子旋转磁场转速与电动机电源的频率成正比，所以在额定转矩范围内，不管负载怎样变动，只要电源频率不变，电动机转速就保持不变，且转子转速与电源频率成正比。交流伺服电动机的机械特性如图 3-3 所示。

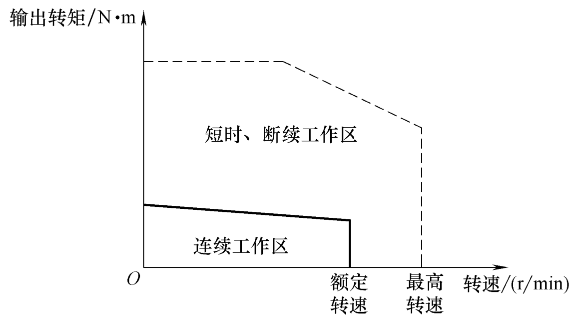


图 3-3　交流伺服电动机的机械特性

交流伺服电动机在额定速度范围内，电动机转矩变化非常小，可以认为是恒转矩，具有非常好的动态特性。在连续工作区（S1 工作制），在电动机温升允许及恒定负载条件下可长时间运行；在断续工作区（S3 工作制），

在电动机温升允许及恒定负载条件下，电动机转矩比连续工作区的转矩大，且随负载率的减小而增加。交流伺服电动机根据速度、输出转矩、惯量及精度等指标有系列化产品，如FANUC交流伺服电动机的αi和βi系列，前者具有很好的加减速性能，最高转速可达6000r/min，最大输出转矩可达500N·m，用于高速、高精度数控机床的伺服进给驱动；后者的加减速及高低速等性能不及αi系列，但性价比较高，用于经济性数控机床的伺服进给驱动。

2. 伺服电动机中的电磁制动器

滚珠丝杠垂直安装（如立式铣床或加工中心的*Z*轴、卧式铣床或加工中心的*Y*轴、斜床身数控车床的*X*轴）时，由于滚珠丝杠无自锁功能，当机床断电且无锁紧装置时，丝杠在主轴箱或刀架重力的作用下产生自旋，主轴箱或刀架会自行下落。为防止这一现象，在伺服电动机上安装电磁制动器（又称电磁抱闸，图3-4），在伺服电动机断电时由抱闸锁紧电动机转子，使丝杠不能转动。

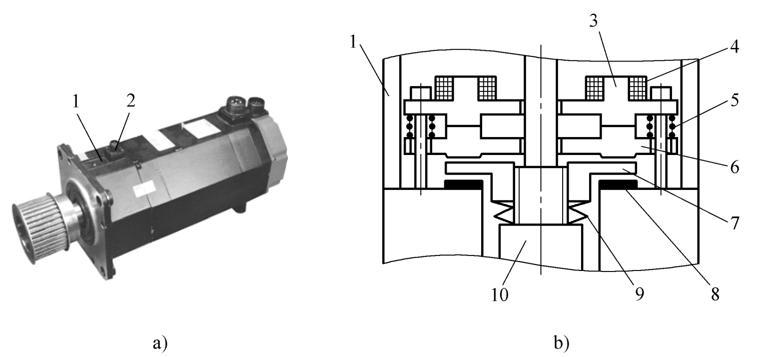


图3-4　电磁制动器

a）带电磁制动器的伺服电动机　b）结构

1—制动器机座　2—制动器接线座　3—铁心　4—制动器线圈　5—制动弹簧　6—衔铁　7—制动盘　8—摩擦片　9—复位弹簧　10—转子轴

电磁制动器中，制动盘通过花键与转子轴连接，随转子一起转动，并可轴向移动。伺服电动机正常运行时，制动器线圈得电（+24V），衔铁在电磁力的作用下克服制动弹簧的作用力与铁心吸合，制动盘在复位弹簧的作用下松开，伺服电动机处于松开状态；制动时，制动器线圈失电，衔铁在制动弹簧的作用下快速轴向移动并推动制动盘，使制动盘紧压在机壳上，通过摩擦片产生的摩擦转矩将转子轴锁紧，从而达到制动的目的。

3.1.2　直线电动机

在由伺服电动机、滚珠丝杠和工作台组成的进给传动中，存在着机械传动误差（如减速机构和丝杠螺母的反向间隙、丝杠螺距累积误差等）和传动刚度低的因素，这些因素会影响到位置精度；另外，受伺服电动机及传动机构的影响，最高运动速度和加速度也受到限制。进给传动采用直线电动机后，取消了电动机到工作台之间的一切中间环节，减小了机械传动误差，传动刚度和定位精度高，响应快（加速度一般可达5~10*g*）。目前，直线电动机

越来越多地应用在高速、高精度的数控机床上。图 3-5a、b 所示分别为直线电动机组成和运行原理。

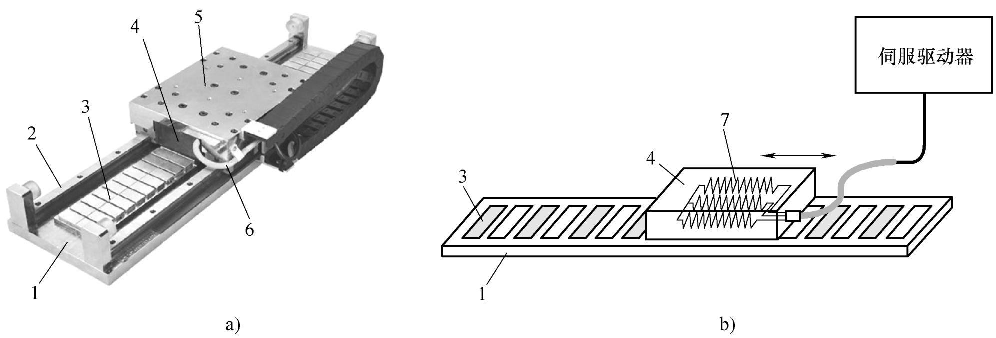


图 3-5　直线电动机
a）组成　b）运行原理
1—底板　2—直线滚动导轨　3—永久磁铁　4—滑块
5—工作台　6—三相绕组电缆　7—三相绕组

直线电动机本质上是交流伺服电动机，由一次侧和二次侧组成。直线电动机的二次侧由底板和永久磁铁组成，底板上一块接一块交替地安装有永磁体；一次侧由滑块和三相绕组组成，滑块中安装有三相绕组，滑块与工作台连接，工作台由直线滚动导轨支承并导向，并使滑块与永久磁铁之间保持一定的气隙。当一次侧通入三相交流电后，产生的气隙磁场沿直线移动，该磁场称为行波磁场，二次侧永久磁铁的磁场与行波磁场相互作用产生电磁推力，则一次侧滑块在电磁推力的作用下做直线运动。直线电动机可以由伺服电动机的驱动器驱动。直线电动机的一次侧和二次侧可安装冷却组件，以便对直线电动机进行冷却散热。图 3-6 所示为直线电动机在数控机床进给传动中的应用。

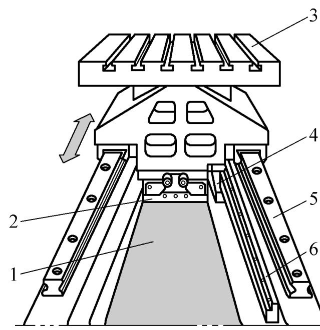


图 3-6　直线电动机在数控机床进给传动中的应用
1—直线电动机磁铁组件
2—直线电动机滑块组件
3—工作台　4—光栅扫描头
5—直线滚动导轨　6—光栅尺

直线电动机磁铁组件固定在机床床身上，滑块组件固定在工作台上，工作台由滚动导轨支承，并使滑块组件与磁铁组件之间保持一定的间隙。光栅扫描头固定在工作台上，随工作台移动，光栅尺固定在工作台上，工作台的移动距离由光栅尺检测获得。

3.1.3　交流伺服驱动

1. 交流伺服电动机控制

交流伺服电动机变频调速是一种自控变频同步电动机系统，表现为变频装置（伺服驱动器）输出电流（电压）的频率和相位受转子磁极位置的控制，是一种定子绕组电源频率和相位自动跟踪转子磁极位置的闭环控制方式。在矢量控制过程中，转子磁极位置为转子磁

极轴线与定子 U 相绕组轴线的夹角 θ，随转子的旋转而变化，该角度可以由伺服电动机同轴连接的编码器或旋转变压器直接检测获得，如图 3-7a 所示。交流伺服电动机（三相交流永磁同步电动机）的矢量控制是建立在转子 d-q 坐标系上的动态数学模型，即转子磁极轴线为 d 轴，顺着旋转方向超前 90°为 q 轴，d-q 坐标系随转子以角速度 ω_0（磁场转速 n_0）在空间旋转，如图 3-7b 所示。通过三相静止定子绕组等效成 d-q 坐标系中的两相旋转绕组，得到交流伺服电动机控制的传递函数框图如图 3-7c 所示。

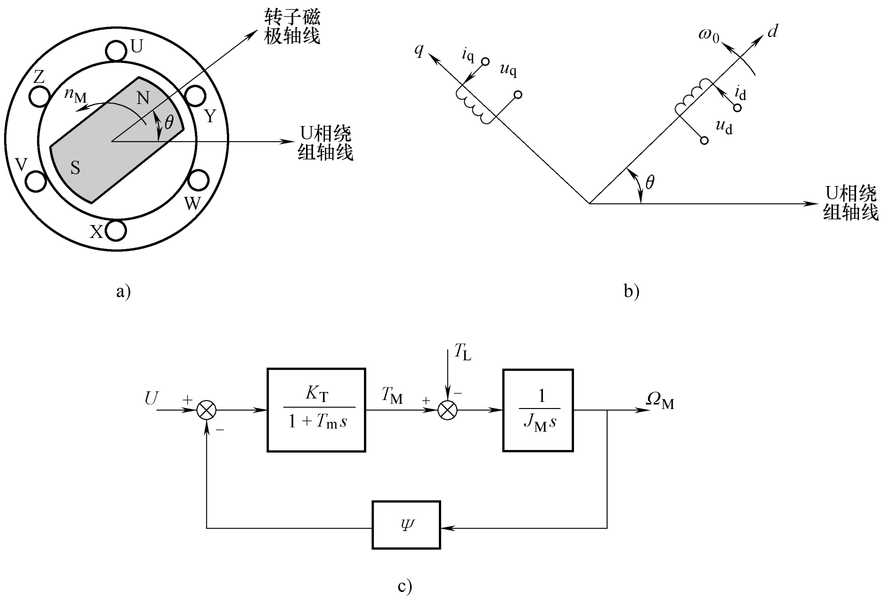


图 3-7　交流伺服电动机控制

a）转子磁极位置　b）d-q 坐标系　c）传递函数框图

图 3-7c 中，U 为定子绕组电压输入，Ω_M 为电动机转子转速输出，K_T 为电磁转矩系数，T_m 为机电时间常数，该常数与定子绕组的电阻与电感有关，ψ 为转子永磁体的有效磁链，T_M 为电动机的电磁转矩，T_L 为负载转矩，J_M 为电动机转子惯量。根据动力学方程，T_M、T_L、J_M 和 Ω_M 之间的关系为：$T_M-T_L=J_M\dfrac{d\Omega_M}{dt}$，通过拉普拉斯变换，电动机转矩与负载转矩比较后经 $\dfrac{1}{J_M s}$ 环节得到伺服电动机转速 Ω_M，该速度由编码器检测并反馈。

2. 交流伺服驱动器及控制信号

交流伺服驱动器本质上是一种用于驱动交流伺服电动机的变频器，交流伺服驱动通过针对交流伺服电动机的矢量控制策略，以及 SPWM 和逆变对交流伺服电动机进行控制，如图 3-8 所示。

由于交流伺服电动机和驱动器是配套设计的，所以通常所指的交流伺服驱动包括同品牌的交流伺服电动机和交流伺服驱动器，如 FANUC αi/βi 系列交流伺服电动机和驱动器、西门子 1FT 和 1FK 系列交流伺服电动机，以及 611D 和 S120 驱动器等。

交流伺服驱动器的控制信号有模拟式和数字式，如图 3-9 所示。

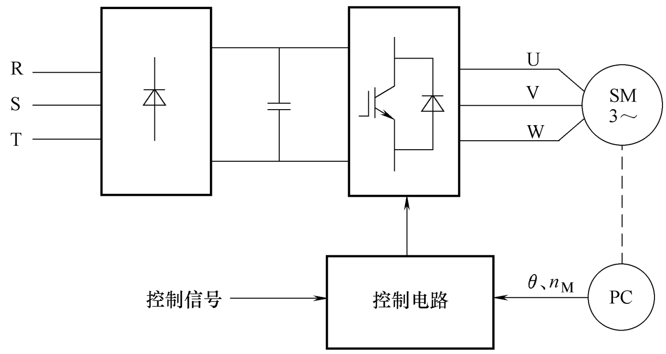


图 3-8　交流伺服驱动器的组成

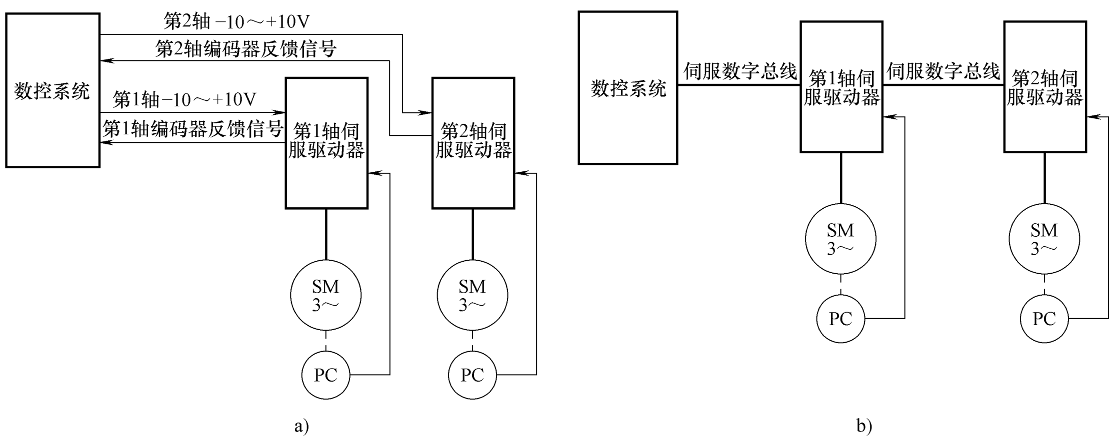


图 3-9　交流伺服驱动器的控制信号

a）模拟信号控制　b）数字总线通信

图 3-9a 中，第 1 轴、第 2 轴由数控系统定义具体的轴名，如数控车床中，第 1 轴定义为 *X* 轴，*Z* 轴定义为第 2 轴；数控铣床中，第 1 轴定义为 *X* 轴，*Y* 轴定义为第 2 轴，*Z* 轴定义为第 3 轴。早期的交流伺服驱动器采用模拟信号控制，数控系统向各伺服驱动器输出−10～+10V 模拟控制信号，信号的正、负决定了伺服电动机的旋转方向，信号的绝对值大小决定了伺服电动机的转速，伺服电动机中的编码器一方面将速度检测信号反馈给伺服放大器，进行速度控制，另一方面通过伺服放大器再将位置检测信号反馈给数控系统，进行位置控制。模拟控制中，设备之间接线多，信号容易受到干扰，影响伺服驱动的稳定性，另外，有关伺服驱动的参数，如速度增益、速度积分时间常数等需要在驱动器上设定，模拟信号控制的交流伺服驱动器有 FANUC α 和 β 系列驱动器、西门子 SIMODRIVE 611A 驱动器等。

随着数字总线控制技术的发展，当前，数控系统与伺服驱动器之间采用数字总线通信的方式，数控系统既可以把控制信号“写”入伺服放大器，又可以“读”取伺服驱动器、伺服电动机及编码器的运行状态，如位置、速度和温度等，进行位置和速度控制及过载、过电

流等监控。数字总线通信控制中，设备之间接线少，信号传输容量大、速度快、抗干扰能力强；有关伺服驱动的参数可以直接在数控系统上进行设定。伺服数字总线有 FANUC αi 和 βi 系列驱动器上的 FSSB 伺服串行总线、西门子 SIMODRIVE 611Ue 驱动器上的 PROFIBUS 总线、西门子 S120 驱动器上的 DRIVE-CLiQ 驱动总线等。

3.1.4 FANUC 伺服驱动器

1. αi 系列驱动器的 SVM 伺服模块

αi 系列驱动器（图 2-14）是一种模块式驱动器，与 FANUC αi 系列主轴电动机和伺服电动机配套，其 SVM 伺服模块的接线及接口如图 3-10 所示。

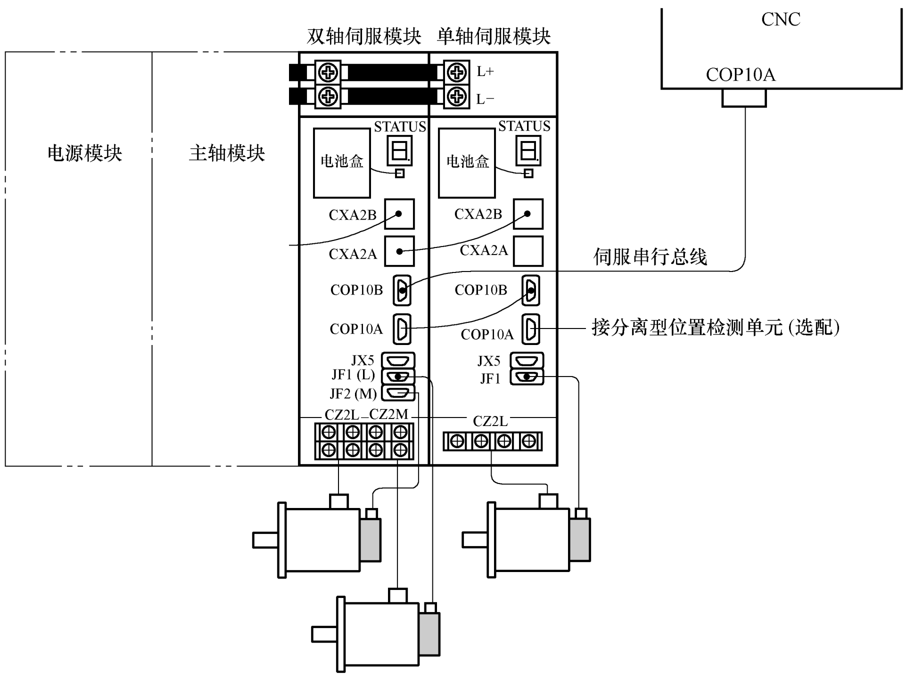


图 3-10　SVM 伺服模块的接线及接口

SVM 伺服模块由主电路板和控制电路板组成，控制电路板可从主电路板中拔出和插入。伺服模块有单轴模块（L 轴）、双轴模块（L 轴、M 轴）及三轴模块（L 轴、M 轴和 N 轴）类型，单轴模块带一个伺服电动机，双轴和三轴模块可带两个和三个伺服电动机。主电路板包含有智能功率模块（IPM）组成的逆变电路，控制电路板通过与数控系统的伺服串行总线通信，经矢量计算及速度和电流控制，最后控制 IPM 的导通或截止，将直流母线电压逆变成三相交流电，作为交流伺服电动机的电源。伺服模块上有一个 1 位 LED 数码指示窗口，正常情况下显示为“0”，故障时会显示故障代码。有关伺服电动机和伺服驱动器等的参数均通过伺服串行总线在数控系统上设定。

接口说明：

L+、L−：直流母线电压“+”“−”端，通过铜排与电源模块的 L+、L−连接。

CZ2L、CZ2M：伺服电动机动力线连接端。

BATTERY：伺服电动机绝对编码器电池盒（DC 6V）。

STATUS：伺服模块状态指示窗口。

CXA2A：DC 24V 电源、急停信号及报警信息的电缆接口，与前一个模块上的 CXA2B 相连。

CXA2B：DC 24V 电源、急停信号及报警信息的电缆接口，与后一个模块上的 CXA2A 相连。

COP10A：伺服串行总线（FSSB）接口，与下一个伺服模块上的 COP10B 相连。

COP10B：伺服串行总线（FSSB）接口，与 CNC 系统的 COP10A 光缆连接。

JX5：伺服检测板信号接口。

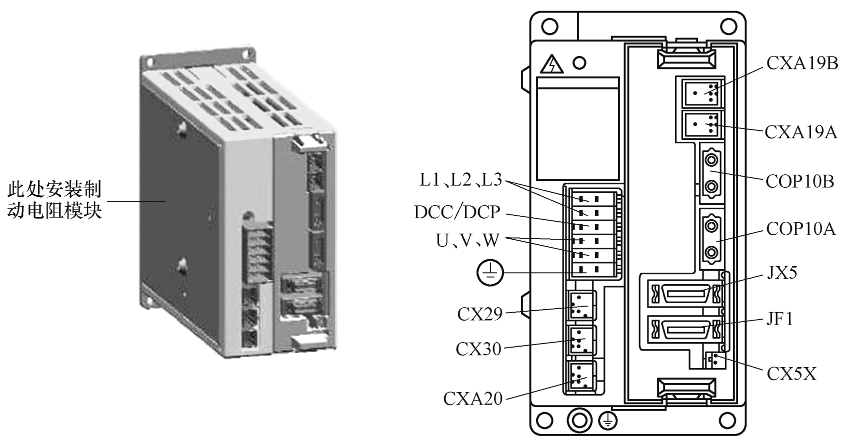
JF1、JF2：第 1 轴、第 2 轴伺服电动机编码器反馈信号接口。

2. βi 系列 SVSP 驱动器

FANUC βi 系列 SVSP 驱动器（图 2-16）与 FANUC βi 系列主轴电动机和伺服电动机配套，其面板上的接口定义和功能与 αi 系列驱动器基本一致。其中，用于伺服控制的接口和接线可参考图 3-10 所示。

3. βi 系列 SVM 伺服驱动器

βi 系列 SVM 伺服驱动器与 FANUC βi 系列伺服电动机配套，该驱动器将主电路中的整流、滤波和逆变以及控制电路整合在一起，体积小，结构紧凑，一般用于小型数控机床单轴进给的伺服驱动。驱动器与数控系统之间采用伺服串行总线通信，外接制动电阻进行能耗制动。根据功率的大小，βi 系列 SVM 伺服驱动器有 4i/20i 和 40i/80i 两种类型。图 3-11a、b 所示分别为 FANUC βi 系列 SVM 伺服驱动器的外观与面板接口。



a)　　b)

图 3-11　FANUC βi 系列 SVM 伺服驱动器

a）外观　b）面板接口

接口说明：

L1、L2、L3：主电源输入端接口，200V、50/60Hz 三相交流电源。

U、V、W：伺服电动机电源接口。

DCC/DCP：外接制动电阻接口。

CX29：主电源接触器（MCC）控制信号接口。

CX30：急停信号接口。

CXA20：外接制动电阻过热信号接口。

CXA19A：控制总线 DC 24V 电源及急停信号输出接口。

CXA19B：控制总线 DC 24V 电源及急停信号输入接口。

COP10A：伺服串行总线（FSSB）接口，与下一个伺服驱动器的 COP10B 连接（光缆）。

COP10B：伺服串行总线（FSSB）接口，与 CNC 系统的 COP10A 连接（光缆）。

JX5：伺服检测板信号接口。

JF1：伺服电动机编码器反馈信号接口。

CX5X：伺服电动机绝对式编码器外接电池接口。

图 3-12 所示为 FANUC βi 系列 SVM 伺服驱动器接线。

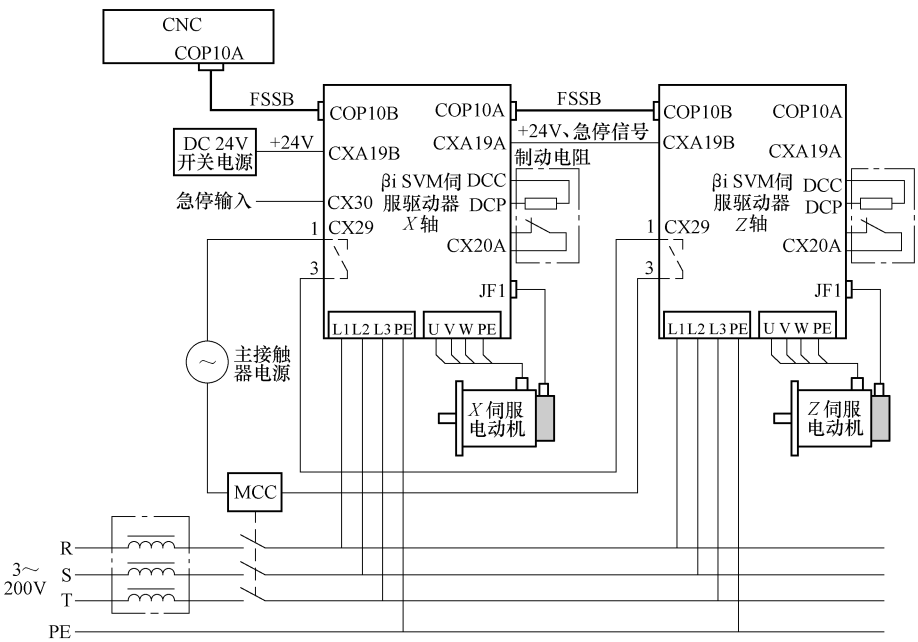


图 3-12　FANUC βi 系列 SVM 伺服驱动器接线

虽然每台 βi 系列 SVM 伺服驱动器有独立的控制电源、急停输入和主接触器控制输出连接接口，但为了能进行统一控制，一方面，外部控制电源+24V 和急停信号只连接到第一个伺服驱动器的 CXA19B 和 CX30 端口上，再由 CXA19A 端口通过控制总线连接到下一个伺服驱动器的 CXA19B 端口，依此类推；另一方面，主接触器控制输出触点以串联的形式连接，即第一个伺服驱动器端口 CX29-1 端连接外部电源一端，CX29-3 端连接下一个伺服驱动器的 CX29-1 端，依此类推，最后一个伺服驱动器的 CX29-3 端与主接触器（MCC）线圈及外部电源另一端连接。当有外部急停信号或伺服驱动故障产生时，任何一个驱动器的 CX29 内部继电器触点断开，就会导致主接触器线圈断电，主触点断开全部伺服驱动器的三相电源，伺服电动机停止运行，起到安全保护的作用。

3.2　伺服电动机及驱动器的选择

3.2.1　伺服电动机的选择

1. 伺服电动机转矩和惯量匹配

伺服电动机与负载之间不仅要求转矩匹配，还要求惯量匹配，只有这样才能取得良好的动态特性。若电动机惯量过小，尽管转矩方面能够达到要求，但是进给轴的加速度可能满足不了，快速性得不到保证，最终导致零件加工精度和表面质量达不到要求。

（1）转矩匹配　对于水平轴，负载摩擦转矩 T_R 与伺服电动机静态转矩 T_s 应满足：

$$0.05T_s \leqslant T_R \leqslant 0.1T_s$$

对于垂直轴或倾斜轴，负载摩擦转矩 T_R 和重力转矩 T_G 与伺服电动机静态转矩 T_s 应满足：

$$T_G + T_R \leqslant (0.2 \sim 0.3) T_s$$

加减速转矩 T_a 与伺服电动机静态转矩 T_s 应满足：

$$T_a \approx 2T_s$$

（2）惯量匹配　负载惯量 J_L 与伺服电动机转子惯量 J_M 应满足：

$$0 < J_L < (2 \sim 3) J_M$$

（3）加减速时间　伺服电动机加减速时，根据转矩平衡方程，电动机输出转矩 T_M 满足：

$$T_M = T_L + T_a$$

式中　T_L——空载时的负载转矩（N·m），包括摩擦转矩 T_R 和重力转矩 T_G。

当伺服电动机采用线性加减速方式时，转速和时间的关系如图 3-13 所示。

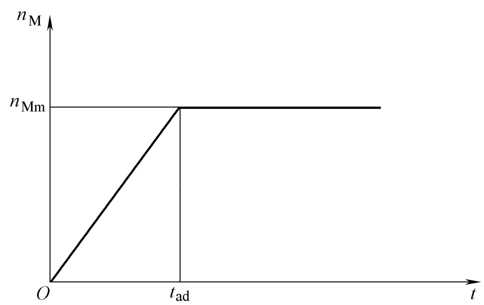


图 3-13　线性加减速

进给系统加速时间 t_{ad} 为

$$t_{ad} = J_{\Sigma} \frac{2\pi n_{Mm}}{60T_a}$$

式中　t_{ad}——加速时间（s）；

n_{Mm}——电动机快速进给转速（r/min）；

J_{Σ}——进给系统总惯量（$kg \cdot m^2$），为负载惯量与电动机转子惯量之和，即 $J_{\Sigma} = J_L + J_M$；

T_a——电动机加减速转矩（N·m）。

2. 伺服电动机的选择设计案例

对于例 1-1 和例 1-2 中涉及的 X 轴，已知丝杠的螺距 $P_b = 12mm$ 要求：①快速进给速度 $v = 32m/min$；②采用线性加速，加速度 $a = 5m/s^2$。

X 轴伺服电动机快速进给转速 n_{Mm} 为

$$n_{Mm} = \frac{1000v}{P_b} = \frac{(1000 \times 32) mm/min}{12mm} = 2667r/min$$

加速时间 t_a 为

$$t_a=\frac{v}{60a}=\frac{32\text{m/min}}{60\times5\text{m/s}^2}=0.107\text{s}$$

（1）初选伺服电动机及转矩匹配校核　已知 X 轴摩擦转矩 $T_R=1.06\text{N}\cdot\text{m}$，根据转矩匹配原则，伺服电动机静态转矩 T_s 应满足：

$$10.6\text{N}\cdot\text{m}\leqslant T_s\leqslant21.2\text{N}\cdot\text{m}$$

X 轴采用 FANUC βi 系列伺服电动机，规格见表 3-1。初步选择 βiS12/3000 型号的伺服电动机，其机械特性如图 3-14 所示。

表 3-1　βiS 系列标准型伺服电动机规格

电动机型号	输出转矩/N·m		额定功率/kW	转速/(r/min)		转子惯量/kg·m²
	静态	最大		额定	最高	
βiS0.2/5000	0.16	0.48	0.05	4000	5000	0.0000019
βiS0.3/5000	0.32	0.96	0.1	4000	5000	0.0000034
βiS0.4/5000	0.4	1	0.2	4000	5000	0.00001
βiS0.5/5000	0.65	2.5	0.2	4000	5000	0.000018
βiS0.5/6000	0.65	2.5	0.5	6000	6000	0.000018
βiS1/5000	1.2	5	0.4	4000	5000	0.000034
βiS1/6000	1.2	5	0.75	6000	6000	0.000034
βiS2/4000	2	7	0.5	4000	4000	0.000291
βiS4/4000	3.5	10	0.75	3000	4000	0.000515
βiS8/3000	7	15	1.2	2000	3000	0.00117
βiS12/2000	10.5	21	1.4	2000	2000	0.00228
βiS12/3000	11	27	1.8	2000	3000	0.00228
βiS22/2000	20	45	2.5	2000	2000	0.00527
βiS22/3000	20	45	3	2000	3000	0.00527
βiS30/2000	27	68	3	2000	2000	0.00759
βiS40/2000	36	90	2.5	1500	2000	0.0099

从表 3-1 中查得，βiS12/3000 伺服电动机的静态转矩 $T_s=11\text{N}\cdot\text{m}$，负载摩擦转矩与电动机静态转矩满足转矩匹配要求。

（2）惯量匹配校核　从表 3-1 中查得，βiS12/3000 伺服电动机转子惯量 $J_M=2.28\times10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$，则（2～3）$J_M=(4.56\sim6.84)\times10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$；经计算已知 X 轴负载惯量 $J_L=4.57\times10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$，负载惯量与电动机转子惯量满足惯量匹配要求。

（3）加减速时间校核　已知 X 轴摩擦转矩 $T_R=1.06\text{N}\cdot\text{m}$，重力转矩 $T_G=0$，则空载负载转矩 T_L 为

$$T_L=T_R+T_G=1.06\text{N}\cdot\text{m}$$

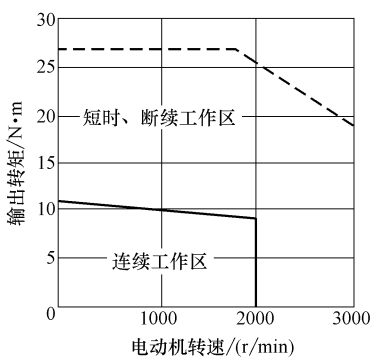


图 3-14　βiS12/3000 伺服电动机的机械特性

从图3-14中查得，βiS12/3000伺服电动机在转速 $n_{Mm}=2667\text{r/min}$ 时的短时输出转矩 $T_M=22\text{N}\cdot\text{m}$，则进给系统加速转矩 T_a 为

$$T_a=T_M-T_L=22\text{N}\cdot\text{m}-1.06\text{N}\cdot\text{m}=20.94\text{N}\cdot\text{m}$$

因为，系统总惯量 J_Σ 为

$$J_\Sigma=J_L+J_M=4.57\times10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2+2.28\times10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2=6.85\times10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

则，进给系统实际加速时间 t_{ad} 为

$$t_{ad}=J_\Sigma\frac{2\pi n_{Mm}}{60T_a}=6.85\times10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2\times\frac{2\pi\times2667\text{r/min}}{60\times20.94\text{N}\cdot\text{m}}=0.091\text{s}$$

因为 $t_{ad}<t_a=0.107\text{s}$，所以进给加减速时间满足设计要求。

综上，选择βiS12/3000伺服电动机是合适的。

3.2.2　伺服驱动器的选择

伺服驱动器的主要技术参数为额定输出电流和最大输出电流，额定输出电流要满足伺服电动机克服摩擦阻力和保证切削加工的转矩要求；最大输出电流应满足伺服电动机加减速时短时加减速转矩的要求。

1. 电流匹配

驱动器的选择要符合电流匹配的原则，即驱动器的输出电流由伺服电动机的电流决定，表示为

$$I_{dN}\geqslant I_V+I_s$$
$$I_{dm}\geqslant I_a+I_s$$

式中　I_{dN}——驱动器的额定电流（A）；

I_{dm}——驱动器的最大输出电流（A）；

I_V——切削电流，即切削加工时电动机电流有效值（A）；

I_s——静态电流，即静态工作时电动机电流有效值（A）；

I_a——加减速电流，即加减速时电动机电流有效值（A）。

（1）切削电流　切削电流 I_V 决定于切削转矩 T_V，即

$$I_V=\frac{T_V}{K_T}$$

式中　K_T——电动机转矩常数（N·m/A）。

（2）静态电流　轴静止时，静态电流由摩擦转矩 T_R 和重力转矩 T_G 决定，即

$$I_s=\frac{T_R+T_G}{K_T}$$

（3）加减速电流　伺服电动机加减速时，加减速电流 I_a 由加减速转矩 T_a 决定，即

$$I_a=\frac{T_a}{K_T}$$

2. 驱动器选择计算

针对例1-1和例1-2中涉及的 X 轴，根据已确定的负载参数及伺服电动机参数（表3-2），计算切削电流、静态电流和加减速电流，从而选择合适的驱动器。

表 3-2　*X* 轴进给驱动参数

负载参数	线性加减速时间 t_a/s	0.107
	系统总惯量 J_Σ/kg·m²	6.85×10^{-3}
	切削转矩 T_V/N·m	9.25
	摩擦转矩 T_R/N·m	1.06
	重力转矩 T_G/N·m	0
	加减速转矩 T_a/N·m	17.88
伺服电动机参数	伺服电动机型号	βiS12/3000
	快速进给转速 n_M/(r/min)	2667
	转矩常数 K_T(N·m/A)	1.08

根据表 3-2 中数据，*X* 轴驱动器电流计算如下：

1）切削电流：$$I_V=\frac{T_V}{K_T}=\frac{9.25\text{N}\cdot\text{m}}{1.08\text{N}\cdot\text{m/A}}=8.56\text{A}$$

2）静态电流：$$I_s=\frac{T_R+T_G}{K_T}=\frac{1.06\text{N}\cdot\text{m}}{1.08\text{N}\cdot\text{m/A}}=1\text{A}$$

3）加减速电流：$$I_a=\frac{T_a}{K_T}=\frac{17.88\text{N}\cdot\text{m}}{1.08\text{N}\cdot\text{m/A}}=16.56\text{A}$$

所以，*X* 轴驱动器额定电流 $I_{dN}\geqslant I_V+I_s=8.56\text{A}+1\text{A}=9.56\text{A}$，驱动器最大输出电流 $I_{dm}\geqslant I_a+I_s=16.56\text{A}+1\text{A}=17.56\text{A}$。选择 FANUC βi SVM-40 驱动器，其额定/最大输出电流为 13A/40A，满足 *X* 轴伺服电动机的要求。

思考题与习题

1. 填充题

（1）交流伺服电动机本质上是________________，其定子中有________，转子上有________。在额定负载的情况下，交流伺服电动机的转速与__________成正比，电动机温度由________检测。

（2）伺服电动机中编码器的作用是__________和__________。

（3）垂直安装的伺服电动机为防止断电时滚珠丝杠螺母下滑，在电动机中安装有________，其控制逻辑是：断电时________，通电时________。

（4）交流伺服驱动器本质上是____________。现代数控系统中，驱动器与数控系统之间的控制信号为__________。

（5）FANUC αi 和 βi 伺服驱动器与 0i C/D 数控系统之间的信号为__________。

2. 简答题

（1）伺服电动机的作用是什么？

（2）伺服电动机的电源来自何处？

（3）模拟式伺服驱动器和数字式伺服驱动器有何区别？

（4）FANUC αi 系列驱动器的 SVM 伺服模块的作用是什么？与 βi 系列 SVSP 和 SVM 驱动器有何区别？

（5）伺服电动机与机械传动匹配的参数有哪些？

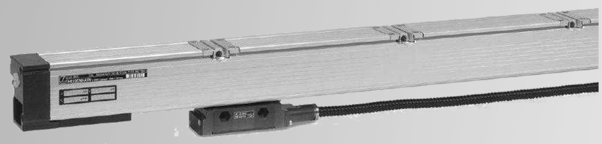
（6）交流伺服电动机驱动器的选择依据是什么？

3. 设计计算题

参考第 1 章末的设计计算题，要求 *Y* 轴快速进给速度为 32m/min，线性加速度为 $5m/s^2$。拟采用 FANUC βiS 系列伺服电动机。试：

1）选择伺服电动机的型号。

2）计算与伺服电动机配套的驱动器的额定电流和最大输出电流。



第 4 章

位置和速度检测

数控机床在加工过程中，数控系统要实时检测当前工作台等运动部件的实际位置和速度，并与指令位置和速度进行比较，实现位置控制和速度控制，以满足位置准确性和速度稳定性的控制要求；同样地，数控系统也要对主轴进行速度检测和位置检测，以便对主轴进行速度和位置控制。现代数控机床常用的位置和速度检测装置有编码器和光栅等。

4.1 编码器

4.1.1 编码器在数控机床中的应用

编码器用于角位移和速度的测量，既可以安装在伺服电动机和主轴电动机中，也可以独立安装。图 4-1 所示为编码器在数控机床中的应用。

图 4-1a 所示为编码器在进给伺服控制中的应用。伺服电动机通过连轴器与滚珠丝杠连接，伺服电动机转动时，伺服电动机内装编码器实时检测出伺服电动机转子的角位移和转速，间接测量直线位移。若丝杠螺距为 P_b，数控系统根据编码器检测到的角位移为 θ，可获得工作台的直线位移 x，即

$$x=\frac{P_b}{360°}\theta$$

半闭环伺服系统中，数控系统根据编码器间接测得的直线位置与指令位置比较而组成位置环控制。图 4-1b 所示为主轴编码器在主轴控制中的应用。主轴编码器与主轴通过同步带 1∶1连接，实时检测主轴的转速和角位移，实现主轴准停、定位、车螺纹和刚性攻螺纹等控制。

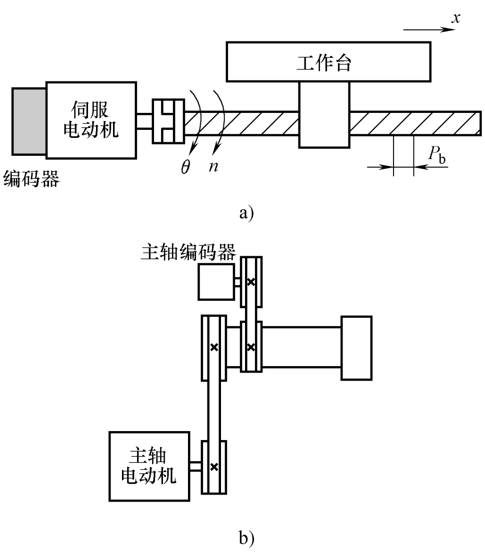


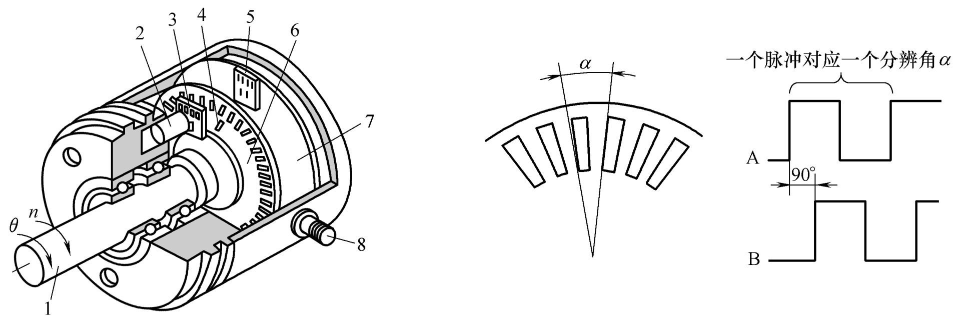
图 4-1　编码器在数控机床中的应用
a）伺服电动机内装编码器　b）主轴编码器

编码器根据测量原理有增量式和绝对式两种类型。

4.1.2　增量式光电编码器

1. 组成及测量原理

增量式光电编码器主要由转轴、码盘、光栏板、光敏元件和信号检测电路板等组成，如图 4-2a 所示。



a)　　　　b)

图 4-2　增量式光电编码器结构组成及检测信号

a）组成　b）检测信号

1—转轴　2—LED　3—光栏板　4—零标志　5—光敏元件　6—码盘

7—信号检测电路板　8—电源及信号连接座

增量式编码器的码盘上刻有节距相等的辐射状透光条纹，相邻两个条纹代表一个分辨角 α，即

$$\alpha = \frac{360°}{条纹数}$$

编码器中有一块固定的光栏板，光栏板上刻有 A、B 两组透光条纹。当码盘随转轴转动时，光线透过码盘和光栏板上的透光条纹照射到光敏元件上，光敏元件就输出 A、B 两路，且相位差 90°电角度的电信号，如图 4-2b 所示。A、B 两路信号用于判断旋转方向，若 A 路信号超前 B 路信号 90°，则表示编码器正转；若 B 路信号超前 A 路信号 90°，则表示编码器反转。

码盘内侧还有一个透光条纹，当码盘每转过一转时，该条纹对应的光敏元件即产生一个电信号 Z，称为零标志脉冲（又称一转脉冲）信号。零标志信号是 A、B 两路脉冲计数的基准。

增量式光电编码器的特点是，每产生一个脉冲信号就对应一个角位移增量，该增量即为分辨角，对脉冲进行计数就是对角位移增量的累积，累积的结果就是被测的角位移；另外，由于计数脉冲频率正比于编码器转速，所以通过对计数脉冲频率的测量，可获得编码器的转速。

例如：某增量式光电编码器指标为 2000 脉冲/转，则每脉冲对应的分辨角为 360°/2000 = 0.18°，当脉冲计数为 1000 时，编码器转过的角度为 0.18°×1000 = 180°。

增量式编码器断电后，当前位置信息即丢失，所以，配置增量式编码器的数控机床每次开机上电后要进行回参考点的操作，即通过寻找零标志信号来确定参考点，以建立测量

基准。

2. 输出信号

增量式光电编码器中的信号检测电路对光敏元件生成的电信号进行处理，对外输出的信号有 TTL 和 $1V_{pp}$sin/cos 等形式，如图 4-3 所示。

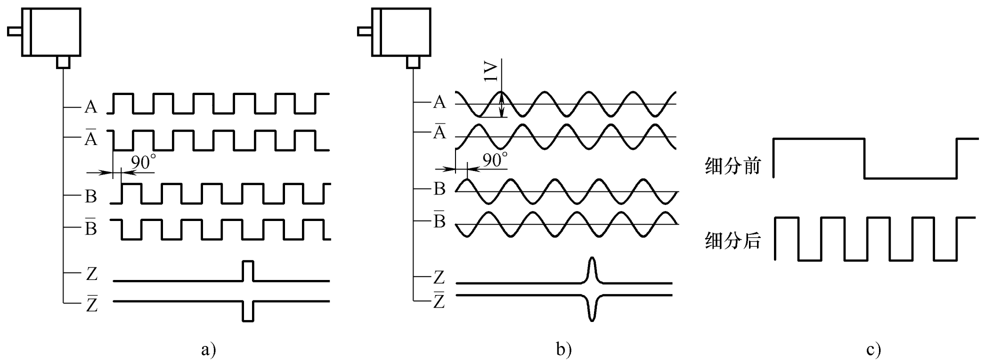


图 4-3　增量式光电编码器的输出信号

a）TTL 输出信号　b）$1V_{pp}$sin/cos 输出信号　c）细分

图中，A 和 $\overline{A}$、B 和 $\overline{B}$、Z 和 $\overline{Z}$ 均为差分信号，一方面可提高信号输出强度，另一方面可消除共模干扰的影响。输出信号还可进行倍频（又称细分），以进一步提高测量分辨力。例如：2000 脉冲/转增量式编码器经 4 倍频后，相当于 8000 脉冲/转，分辨角由 0.18°变为 0.045°。

4.1.3　绝对式光电编码器

绝对式光电编码器的结构与增量式编码器类似，由码盘、LED、光敏元件及信号检测电路等组成，检测信号为二进制编码，每一个编码对应一个角度位置，如图 4-4 所示。

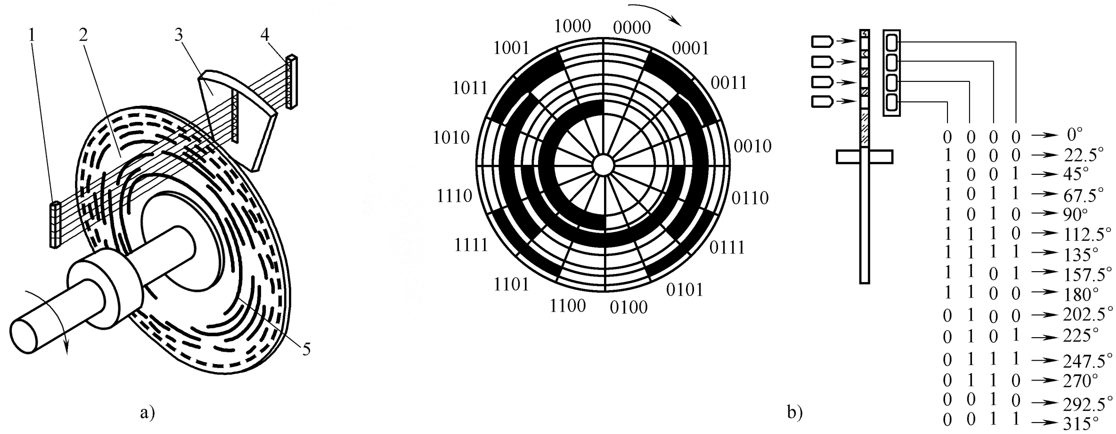


图 4-4　绝对式测量及二进制编码

a）绝对式测量　b）4 码道码盘和二进制编码（格雷码）

1—光源　2—绝对式码盘　3—光栏板　4—光敏元件　5—码道

绝对式码盘上有码道（又称轨迹），图 4-4a 所示的码盘上由内至外有 8 条码道，各码道上按二进制规律刻有透光或不透光的条纹；码盘一侧是光源，另一侧为一组光敏元件。当码盘转到某个角度位置时，与各码道对应的光敏元件受光的输出“1”电平，不受光的输出“0”电平，由此组成一组二进制码。二进制码的位数即为码道数，每组二进制码对应唯一的一个角度，如图 4-4b 所示。绝对式编码器的分辨角 α 为

$$\alpha=\frac{360^\circ}{2^N}$$

式中　N——二进制位数（码道数）。

显然，位数 N 越大，分辨角越小，测量精度就越高。例如：4 码道绝对式编码器的分辨角 $\alpha=360^\circ/2^4=22.5^\circ$；若为 13 码道，则分辨角 $\alpha=360^\circ/2^{13}=2.64'$。

二进制编码有自然二进制码和格雷码两种类型，自然二进制编码中，被测角度每变化一次，二进制编码中有可能多位产生“0”和“1”的变化，容易产生错码，可靠性低；格雷码中，被测角度每变化一次，二进制编码中只有一位发生“0”和“1”的变化，如图 4-4b 所示。格雷码有利于减少错码，提高可靠性。

另外，由于二进制码是在 360°内分布的，当码盘从 0°转到 360°时，编码又回到初始值，分辨不出码盘转过的圈数，所以，在进行角位移测量时，要采用多圈绝对式编码器。多圈绝对式编码器有多种形式，一是多圈绝对式编码器有两组编码，一组为角度编码，另一组为圈数编码，如西门子 25 轨迹多圈绝对式编码器，其中，13 轨迹用于角度编码，另外 12 轨迹用于计圈编码；二是绝对和增量混合方式，即在绝对式码盘外缘另刻有增量式条纹，用于计圈；三是类似钟表时、分、秒结构的机械绝对式编码器，多个绝对式码盘按一定的传动比由机械齿轮传动，用于角度编码和计圈。

绝对式编码器的位置数据保存在存储器中，由外部锂电池保持，断电后数据不会丢失，所以，配置绝对式编码器的数控机床只要回一次参考点，数控系统就记忆了参考点的位置，以后每次开机上电后不需进行回参考点的操作。但是，当外部锂电池电压低或消失时，位置数据就会丢失，更换电池后须重新建立参考点。

4.1.4　伺服电动机中的编码器

1. FANUC 伺服电动机中的串行编码器

参见第 3 章中图 3-1 所示的 FANUC 交流伺服电动机，增量式和绝对式编码器的转轴通过联轴器与伺服电动机转子同轴连接，两者的数据传输都采用串行通信的方式，统称为串行编码器，如图 4-5 所示。

图 4-5 中，数控系统与伺服放大器之间是伺服串行通信，编码器与伺服放大器之间通过电缆也是串行通信，这样，数控系统与编码器之间组成了数据通信链。在数据传输过程中，数控系统向编码器发出请求信号（REQ），编码器接收到请求信号后，将位置、速度及报警等信息（SD）发送给数控系统，数控系统接收到这些信息后，就可以进行位置和速度控制了，同时还监控编码器的状态，故障时及时发出报警信息。

2. 西门子伺服电动机中的编码器

西门子伺服电动机中配置的是 HEIDENHAIN 增量式或绝对式编码器，编码器转轴上有通孔，如图 4-6a 所示；转子轴末端有沉孔和螺纹孔，编码器通过安装支架与机座固定，转

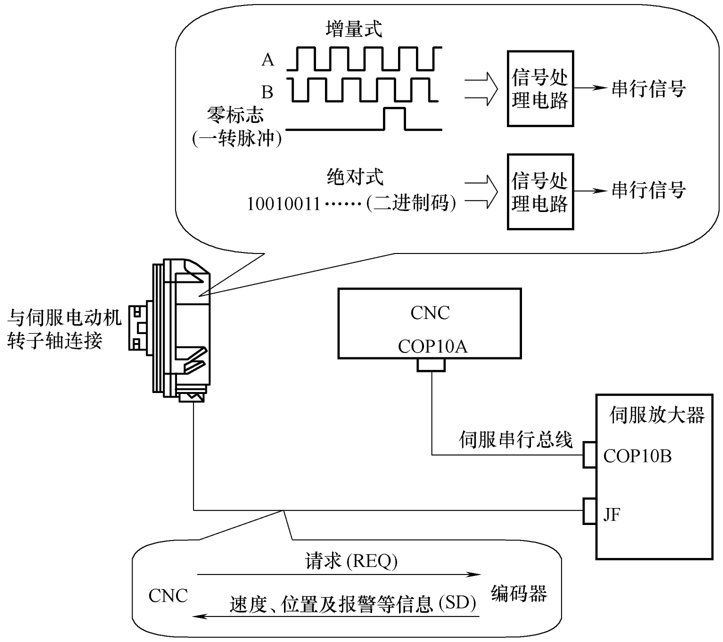


图 4-5　串行编码器

轴通过连接螺钉与电动机转轴同轴连接，如图 4-6b 所示；新型号伺服电动机中，编码器可通过连接卡口直接与电动机转轴连接。增量式和绝对式编码器在伺服电动机上的插座引脚如图 4-7 所示，表 4-1 所列为编码器引脚信号。

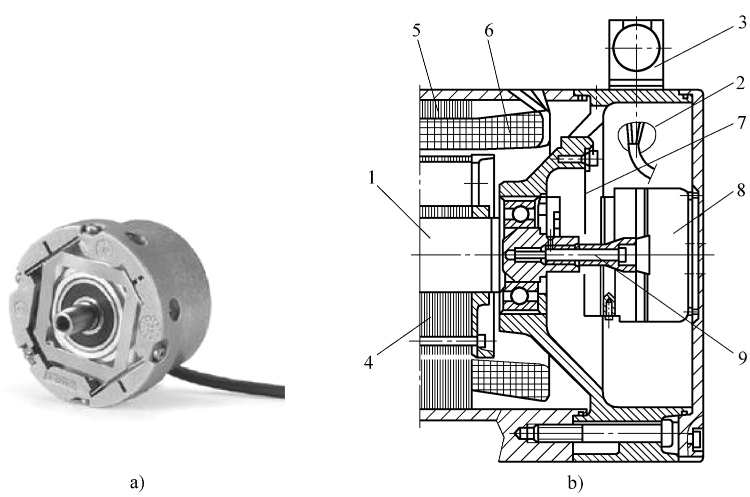
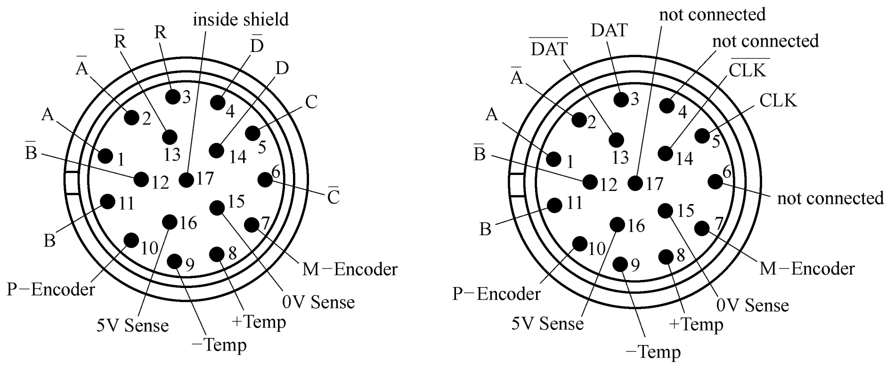


图 4-6　西门子伺服电动机中的编码器

a）编码器外观　b）编码器在伺服电动机中的安装

1—转子轴　2—电源连接座　3—编码器电缆插座　4—转子铁心　5—定子铁心

6—定子三相绕组　7—安装支架　8—编码器　9—编码器连接螺钉



a)　　　　b)

图 4-7　编码器插座引脚

a）增量式编码器插座引脚　b）绝对式编码器插座引脚

表 4-1　编码器引脚信号

引脚	增量式编码器		绝对式编码器	
	名称	意　　义	名称	意　　义
1	A	A 相脉冲输出信号	A	A 相脉冲输出信号
2	$\overline{A}$	$\overline{A}$ 相脉冲输出信号	$\overline{A}$	$\overline{A}$ 相脉冲输出信号
3	R	R 相脉冲输出信号	DAT	EnDat 数据脉冲信号
4	$\overline{D}$	$\overline{D}$ 相脉冲输出信号		备用
5	C	C 相脉冲输出信号	CLK	EnDat 时钟信号
6	$\overline{C}$	$\overline{C}$ 相脉冲输出信号		备用
7	M-Encoder	电源(0V 端)	M-Encoder	电源(0V 端)
8	+Temp	电机过热触点信号	+Temp	电机过热触点信号
9	−Temp	电机过热触点信号	−Temp	电机过热触点信号
10	P-Encoder	编码器电源(+5V 端)	P-Encoder	编码器电源(+5V 端)
11	B	B 相脉冲输出信号	B	B 相脉冲输出信号
12	$\overline{B}$	$\overline{B}$ 相脉冲输出信号	$\overline{B}$	$\overline{B}$ 相脉冲输出信号
13	$\overline{R}$	$\overline{R}$ 相脉冲输出信号	$\overline{DAT}$	EnDat 的数据脉冲信号
14	D	D 相脉冲输出信号	$\overline{CLK}$	EnDat 的时钟信号
15	0V Scnse	检测电源(0V)	0V Scnse	检测电源(0V)
16	5V Scnse	+5V 检测电源	5V Scnse	+5V 检测电源
17		屏蔽		备用

增量式编码器中，A($\overline{A}$) 和 B($\overline{B}$) 为一组辨向脉冲信号，R($\overline{R}$) 为零标志脉冲信号，C($\overline{C}$)和 D($\overline{D}$) 为一组相位差 90°，且一转一个周期的脉冲信号。表中所示的绝对式编码器为增量和绝对混合式的编码器，其中 A($\overline{A}$) 和 B($\overline{B}$) 为一组相位差 90°的脉冲信号，DAT($\overline{DAT}$)和 CLK($\overline{CLK}$) 为一组符合 EnDat 通信协议的数字信号。

EnDat 是一种适用于绝对式编码器数据传输的双向数字接口协议，其传输时序如图 4-8 所示。

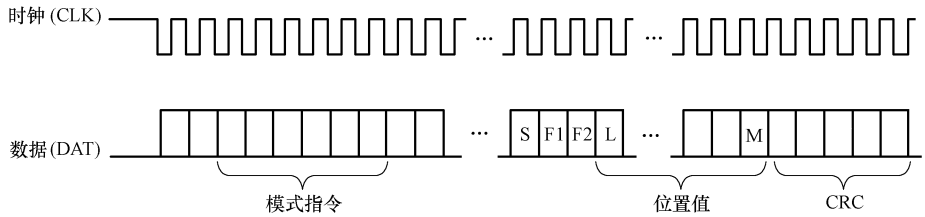


图 4-8　EnDat 时序

S—开始位　F1—错误位 1　F2—错误位 2　L—最低位　M—最高位

数据（DAT）传输是在时钟（CLK）脉冲的协调下进行的。数据包括模式指令、位置值、参数、诊断等信息，模式指令来自数控系统，决定被传输信息的类型，由二进制码设定，若模式指令为位置方式，则要求编码器发送位置数据。编码器接收到位置模式指令后，即计算绝对位置，并从开始位（S）开始向数控系统传输数据，错误位（F1）和（F2）用于监测位置值的故障，并将故障信息保存在状态存储器中，然后，编码器从最低位（L）到最高位（M）发送绝对编码的位置值，位置数据发送以循环冗余校验（CRC）结束。

4.1.5　旋转变压器

旋转变压器是一种利用电磁感应原理来测量角度的精密传感器。旋转变压器由定、转子铁心及绕组构成，坚固耐用，不像光电编码器中的码盘会因受冲击或振动而造成损坏，适合在恶劣的环境中使用。伺服电动机除了选装光电编码器外，也可选装旋转变压器（图 4-9）。

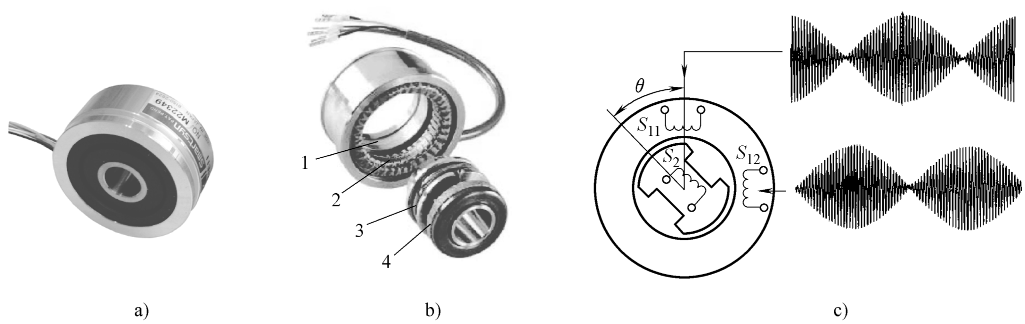


图 4-9　旋转变压器

a）外观　b）结构组成　c）测量原理

1—变压器二次侧绕组　2—分解器定子绕组　3—变压器一次侧绕组　4—分解器转子绕组

旋转变压器实际上是一种特制的两相电机，分解器定子绕组上有两个正交的绕组，并通入励磁电压，当转子旋转时，定、转子绕组间的相对位置发生变化，分解器转子绕组上的感应电压与转子角度成一定的函数关系。

图 4-9c 中，分解器定子两个正交绕组 S_{11} 和 S_{12} 分别通入两个幅值相等、相位差 90°、经

载波（10kHz）调制后的正弦交流励磁电压 u_{11} 和 u_{12}，即

$$u_{11}=U_m\sin\omega t$$

$$u_{12}=U_m\cos\omega t$$

式中　U_m——交流励磁电压幅值。

转子转过 θ 角度时，分解器转子绕组 S_2 感应电压 u_2 为

$$u_2=kU_m\sin(\omega t+\theta)$$

式中　k——电压幅值系数；

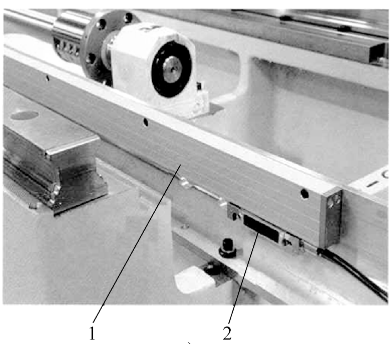
θ——转子绕组轴线与定子绕组轴线的夹角。

感应电压随转子旋转角度的变化而变化，检测出感应电压即可检测出转子旋转角度。为了将转子绕组上的感应电压引出来，实际使用的旋转变压器由两部分组成，一部分为分解器，由定子和转子组成；另一部分为变压器。变压器的一次绕组与分解器的转子绕组固定在转轴上，随转子一起旋转，分解器中的转子绕组引出线连接到变压器的一次绕组上；变压器的二次绕组与分解器中的定子分别固定在壳体上。分解器的定子绕组外加励磁电压，转子旋转时分解器转子绕组的感应电压通过变压器一次绕组，经耦合由变压器的二次绕组输出。

4.2　光栅

4.2.1　光栅在数控机床中的用途

光栅是一种高精度的位置传感器，有长光栅和圆光栅两种类型，长光栅用于直线位移测量，又称直线光栅，用于工作台等移动部件直线位移的测量，如图 4-10a 所示；圆光栅用于角位移测量，常用于数控回转工作台和主轴角位移的测量，如图 4-10b 所示。



a)


b)

图 4-10　光栅

a）直线光栅　b）圆光栅

1—光栅尺　2—扫描头

图 4-10a 中，光栅尺身固定在机床床身上，扫描头固定在工作台上，扫描头随工作台一起移动，将工作台的直线位移量转换成电信号由电缆输出。在闭环伺服系统中，将光栅直接测量得到的直线位置与指令位置进行比较构成位置环控制。光栅根据测量原理有增量式和绝

对式两种类型。

4.2.2 增量式光栅

1. 组成

增量式光栅如图 4-11 所示。标尺光栅（又称主尺）在尺身内固定不动，标尺光栅由光学玻璃或不锈钢带制成，标尺光栅上刻有等间距的条纹，该间距称为栅距 ω；另外，标尺光栅上还刻有一组零标志条纹，并按等差规律排列，其目的在于，在回参考点的过程中，能就近寻零标志，节省回参考点的时间。与标尺光栅相对应的指示光栅（又称副尺）也刻有等间距的条纹，指示光栅固定在扫描头内，随扫描头一起移动。根据光线的投射方式，光栅有透射式光栅和反射式光栅，图 4-11 所示的光栅为透射式增量光栅。

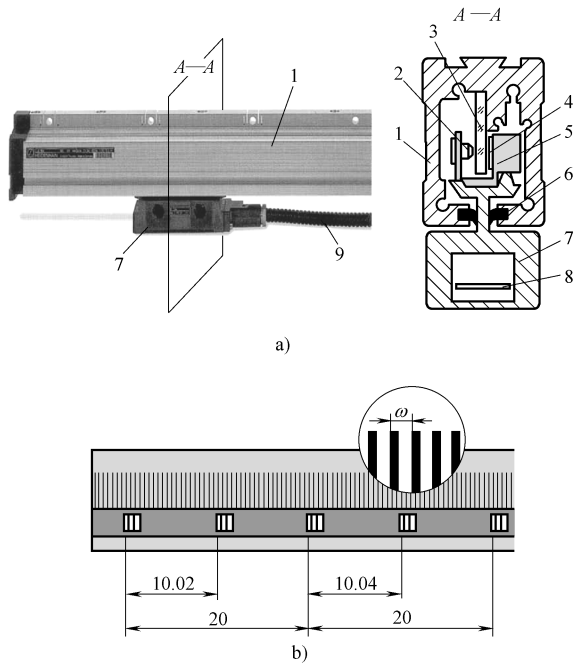


图 4-11 增量式光栅

a）外观及结构组成 b）带参考点距离编码的增量式标尺光栅

1—尺身（铝合金外壳） 2—带聚光透镜的 LED 3—标尺光栅 4—指示光栅 5—游标（带光敏元件） 6—密封唇 7—扫描头 8—电子线路板 9—电源及信号电缆

2. 测量原理

在图 4-12a 所示的透射式增量光栅中，当指示光栅随光源、透镜及光敏元件一起相对于标尺光栅左右移动时，指示光栅和标尺光栅相向间的条纹产生光学现象，表现为在指示光栅上产生上下移动且明暗相间的条纹，该条纹称为莫尔条纹，如图 4-12b 所示。

指示光栅每移动一个栅距，即产生一个莫尔条纹，光敏元件接收到莫尔条纹明暗相间的变化，即产生电信号，检测电路对光敏元件产生的电信号进行处理并输出测量信号，如 TTL 或 $1V_{pp}$sin/cos 信号。因为莫尔条纹的宽度远大于栅距，所以，莫尔条纹具有对栅距进行放大的作用。对输出脉冲进行计数，就是对栅距进行累积，累积的结果就是被测直线位移。例如：光栅栅距为 20μm，计数脉冲为 1000，则被测直线位移为 $20\mu m \times 1000 = 20000\mu m = 20mm$。

另外，莫尔条纹移动的方向与指示光栅的移动方向相关，当指示光栅往右移动时，莫尔条纹往下移动；反之亦然。通过一组光敏元件对莫尔条纹的移动方向进行检测，输出两路相位差 90°的电信号进行辨向。

输出的测量信号还可以进行倍频，以进一步提高测量分辨力。例如：某栅距为 20μm 的直线光栅，经 5 倍频后，栅距相当于 $20\mu m/5 = 4\mu m$，提高了测量分辨力。表 4-2 所列为增量式光栅参数，供参考。

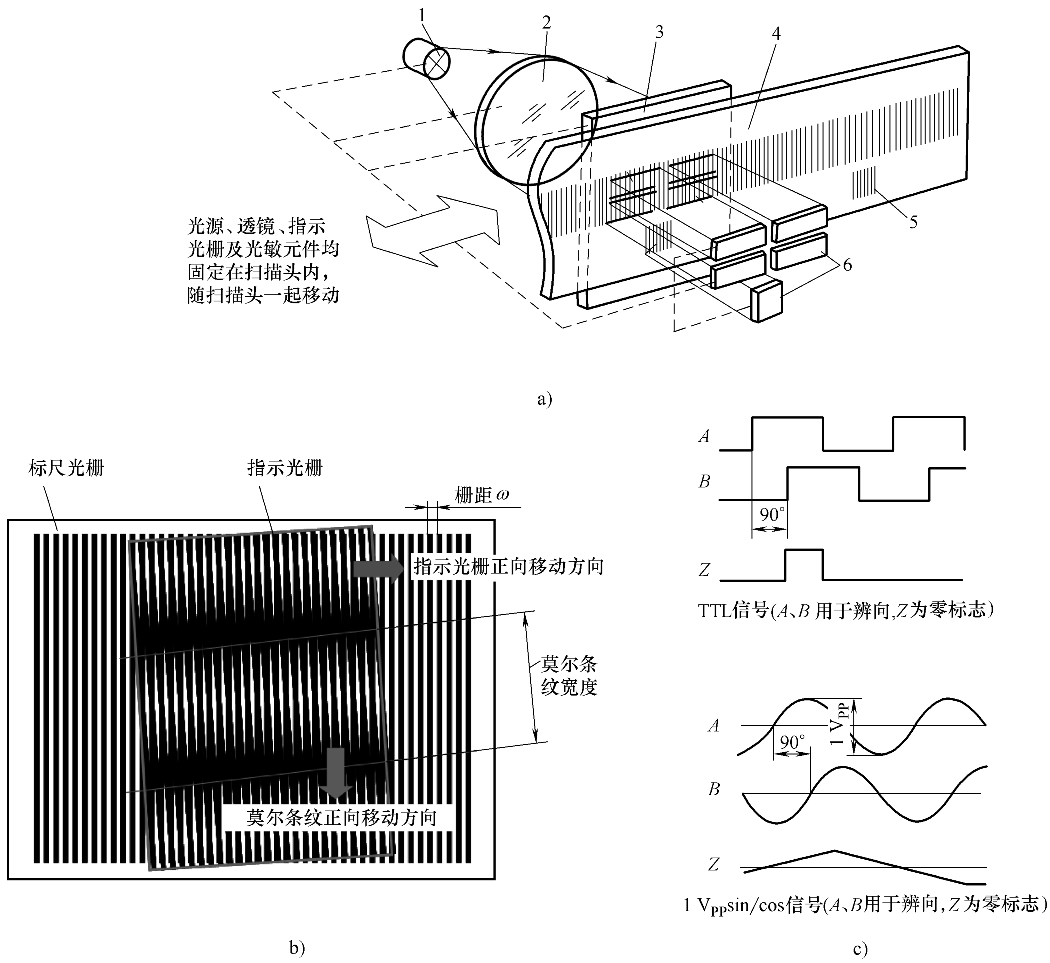


图 4-12　增量式光栅测量原理

a）透射式增量光栅组成　b）莫尔条纹　c）测量信号

1—光源　2—透镜　3—指示光栅　4—标尺光栅　5—零位光栅　6—光敏元件

表 4-2　增量式光栅参数

技术参数		LS187	LS177		
测量基准		DIADUR 刻线的玻璃光栅尺			
精度等级		±5μm，±3μm			
测量长度/mm		140，240，340，440，540，640，740，840，940，1040，1240，1340，1440，1540，1640，1740，1840，2040，2240，2640，2840，3040			
参考点	LS187	每 50mm 可用磁条选择，标准设置：中心处 1 个参考点			
	LS187C	距离编码			
增量信号		~1V_{PP}	TTL	TTL	TTL
栅距/μm		20	20	20	20
细分倍数		—	5 倍	10 倍	20 倍
信号周期/μm		20	4	2	1

4.2.3 绝对式光栅

绝对式光栅与增量式光栅的结构基本相同，由光源、透镜、指示光栅、标尺光栅和光敏元件等组成，但绝对式光栅的标尺光栅上刻有一组二进制编码的条纹，如图 4-13 所示。

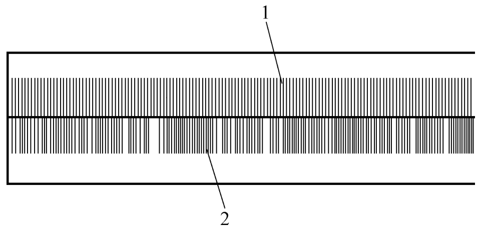


图 4-13 绝对式光栅的标尺光栅

1—增量刻线 2—二进制码刻线

指示光栅相对于标尺光栅移动时，与指示光栅对应的光敏元件“读”出当前位置的二进制码。绝对式光栅通常按一定的通信协议采用串行通信方式进行数据传输。表 4-3 所列为绝对式光栅参数，供参考。

表 4-3 绝对式光栅参数

技术参数		LC183	LC193F	LC193M
测量基准		DIADUR 玻璃光栅带绝对量和增量刻轨		
测量精度		±3μm(不超过 3040 最大测量长度),±5μm		
测量长度/mm		140,240,340,440,540,640,740,840,940,1040,1140,1240,1340,1440,1540,1640,1740,1840,2040,2240,2440,2640,2840,3040,3240,3440,3640,3840,4040,4240		
绝对位置值		EnDat	FANUC 02 串口	Mistubishi 高速串口
分辨率	精度±3μm	0.005μm	0.01μm	
	精度±5μm	0.01μm	0.05μm	
计算时间	EnDat2.1	<1ms	—	
	EnDat2.2	≤5μs	—	
增量信号		~1V_{PP}	—	
栅距/信号周期		20μm	—	

4.3 回参考点

4.3.1 参考点

数控机床原点是各坐标轴的测量基准，机床原点是固定的，机床参考点是相对于机床原点的一个位置点，参考点与机床原点之间有严格的尺寸关系，并在系统参数中设定。增量式测量因为系统断电后位置无记忆功能，所以每次开机上电后要进行回参考点的操作，当轴到达参考点后即确认了机床原点，测量基准建立。绝对式检测因为系统有断电记忆功能，一次回参考点后，系统即记住参考点位置，以后每次开机上电后不需要进行回参考点的操作，除非参考点位置丢失，须重新设定。图 4-14 所示为数控车床的机床原点和参考点。

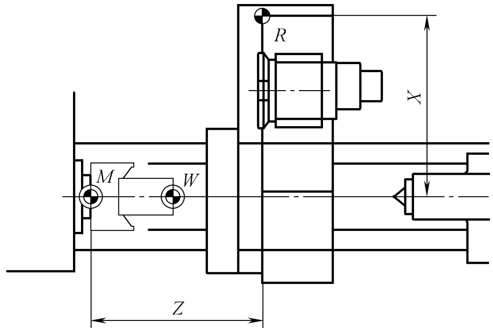


图 4-14 数控车床的机床原点和参考点

M—机床原点 *R*—参考点 *W*—工件坐标系原点

数控车床机床原点在主轴端面中心，参考点通常设置在坐标轴的正向极限位置附近，与机床原点之间的距离 X 和 Z 设定在数控系统有关参数中，如 FANUC 系统 1240 号参数（PRM1240）、西门子系统 34100 号参数（MD34100）。

4.3.2　FANUC 数控系统增量式回参考点

增量式回参考点必须有减速开关信号和零标志信号，减速开关安装在工作台上，零标志信号由增量式编码器的一转脉冲产生。图 4-15 所示为 FANUC 系统回参考点过程。

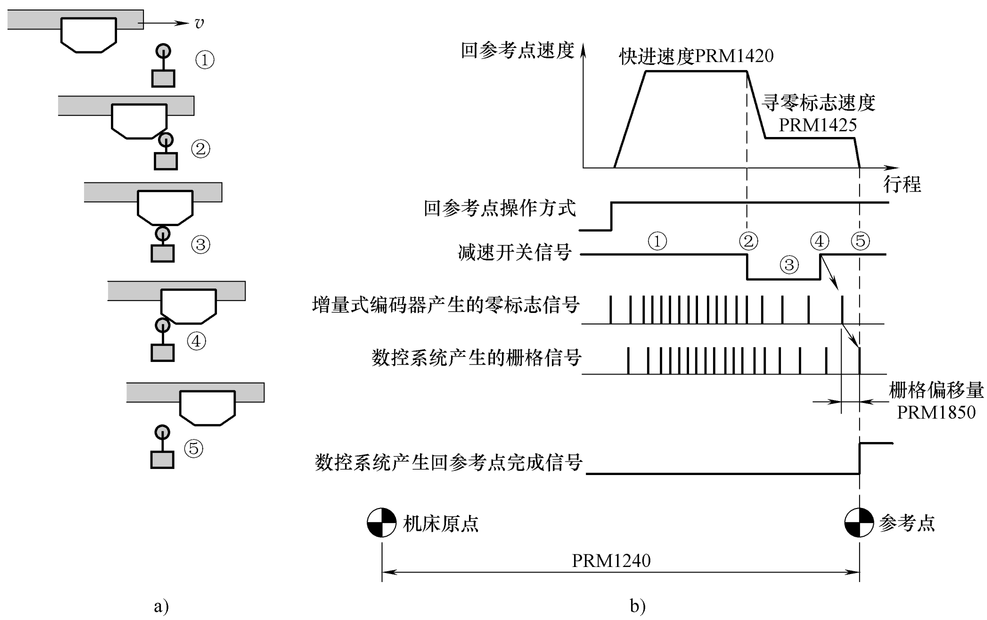


图 4-15　FANUC 系统回参考点过程

a）减速开关动作　b）回参考点信号

对应图 4-15 中的①~⑤步序，回参考点过程如下：

① 机床处于回参考点操作方式，选择回参考点的轴，轴快速向参考点方向运动，运动速度在数控系统 PRM1420 参数中设定。

② 撞块压上减速开关，开关状态由常闭变为断开。

③ 轴由快速转为低速继续向参考点方向移动，移动速度在数控系统 PRM1425 参数中设定。此过程中，减速开关在撞块的作用下保持为断开状态。

④ 撞块脱开减速开关，开关状态由断开变为闭合，数控系统接收到减速开关由闭合→断开→闭合（表示为“1→0→1”）的变化，立即寻找编码器自此开始产生的零标志信号。

⑤ 轴找到零标志后再移动一个栅格偏移量后停止，停止位置即为参考点。栅格信号是数控系统根据编码器零标志脉冲而产生的电气信号，栅格偏移量设定在 PRM1850 参数中，用来调整参考点与机床原点的位置，参考点与机床原点之间的距离设定在数控系统参数 PRM1240 中。回参考点结束后，数控系统发出回参考点结束信号。

4.3.3　西门子数控系统增量式回参考点

西门子数控系统增量式回参考点有零标志脉冲在减速开关撞块外和减速开关撞块上两种

方式。图 4-16 所示为零标志脉冲在减速开关撞块外的回参考点过程。

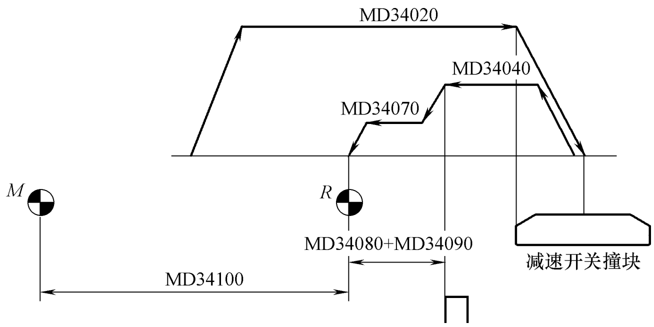


图 4-16　零标志脉冲在减速开关撞块外的回参考点过程

回参考点过程中，轴先向参考点方向运动，撞上减速开关后停止在减速挡块上，轴再反向运动并脱离减速开关。数控系统在接收到减速开关断开→闭合→断开的信号变化后，数控系统开始寻找零标志信号，完成回参考点的过程。回参考点的参数有：

MD34020：回参考点快速运动速度。

MD34040：寻零标志速度。

MD34070：定位速度。

MD34080：参考点偏移。

MD34090：参考点撞块电子偏移。

MD34100：参考点相对机床原点的位置。

思考题与习题

1. 填充题

（1）编码器可测量__________和__________。

（2）增量式编码器检测脉冲的数量决定了__________，脉冲频率决定了__________。增量式编码器每转脉冲数越多，则测量分辨力越________（高或低）。

（3）增量式编码器输出 A、B 两路相位差 90°的 TTL 或 $1V_{PP}$ sin/cos 信号的目的是________，A 和 $\overline{A}$、B 和 $\overline{B}$ 称为__________。

（4）增量式编码器因为有断电失去当前位置的特点，因此，每次开机通电后须进行______操作。在此过程中，轴经历了①________、②__________和③________的过程，其中，③的信号由编码器________产生。

（5）绝对式编码器的输出信号为________，其位数越多，则测量分辨力越________（高或低）。

（6）绝对式编码器因为有外部________保存数据，断电后当前位置信息不会丢失，所以，每次开机通电后不必进行________操作。

（7）旋转变压器是一种利用________原理来测量角度的传感器，在定子绕组中通入两相高频、正交的励磁电压后，转子转动时，转子绕组感应电压的相位角即为________。

（8）增量式光栅中，莫尔条纹的作用是________________。因为莫尔条纹数与光栅栅格数相对应，所以，光栅移动时，通过对莫尔条纹和光敏元件产生的________进行计数，以栅距的累积得到光栅的移动量；增量式光栅的移动方向是通过__________来进行分辨的。

（9）EnDat 是一种适用于__________ 编码器和光栅的数据传输协议。

2. 简答题

（1）增量式测量和绝对式测量的信号特征是什么？

（2）增量式光电编码器输出的“六脉冲信号”是指什么？

（3）FANUC 串行编码器的含义是什么？

（4）参见表 4-2 中有关参考点的技术参数，说明采用带距离编码的增量式光栅有什么意义。

（5）说明多圈绝对式编码器的含义。

3. 计算分析题

（1）某伺服电动机同轴安装有 2000 脉冲/转增量式编码器，伺服电动机与螺距为 6mm 的滚珠丝杠通过联轴器连接，在位置控制伺服中断 4ms 内，共计 20 脉冲，问：

1）工作台移动的距离（mm）。

2）伺服电动机的转速（r/min）。

（2）数控机床伺服系统中，编码器进行角位移检测有两种方式，一是伺服电动机内装编码器；二是独立编码器，如图 4-17 所示。回答下列问题：

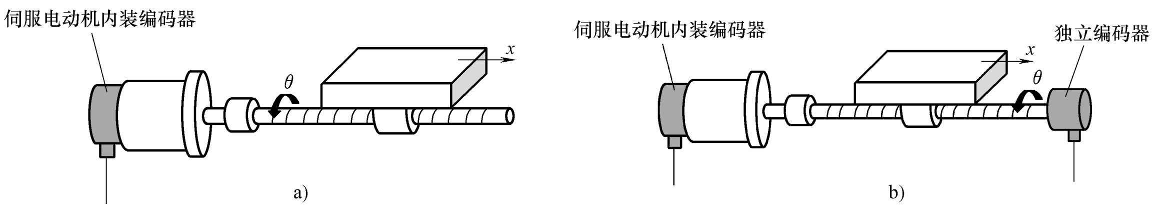


图 4-17　计算分析题（2）图

1）题图 4-17a 中，内装编码器的作用是什么？

2）题图 4-17b 中，内装编码器和独立编码器的作用分别是什么？

3）内装编码器和独立编码器的位置检测有什么区别？对位置控制精度有什么影响？

（3）图 2-12 所示的 FANUC 交流主轴电动机中有 Mi/MZi 磁电式传感器，其结构示意图如图 4-18 所示。

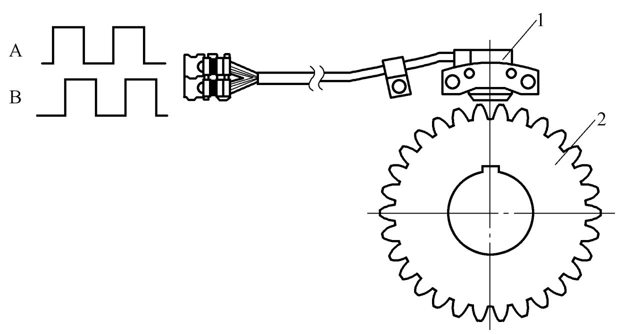


图 4-18　计算分析题（3）图

1—磁电开关　2—齿盘

磁电开关固定在电动机机壳上，齿盘固定在转子轴上，随轴转动。当齿盘转过一个齿时，磁电开关即输出一个脉冲。回答下列问题：

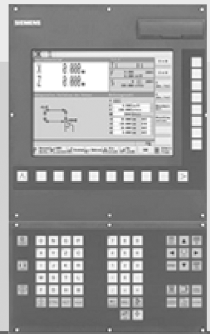
1）Mi/MZi 磁电式传感器是增量式还是绝对式的？

2）A/B 相脉冲的作用是什么？

3）若齿盘规格为 512 齿，在主轴控制中断 4ms 时间内，测得的脉冲数为 256。则：

① 主轴转过多少角度？

② 主轴转速为多少（r/min）？



第 5 章

数控原理及系统

数控系统是数控机床运算和控制的核心，它本质上是一台专门用于机床控制的计算机，通过硬件和软件实现数据处理，包括译码、刀具补偿及插补运算等，功能控制包括主轴和伺服控制、辅助功能控制、通信、监视及诊断等。

5.1　数据处理及控制功能

数控加工程序包含的信息有：主轴 S 指令，轨迹指令 G00、G01、G02、G03，坐标值指令 X、Y、Z，速度指令 F，辅助功能指令 M、T。数控系统需要对这些信息进行数据处理，输出控制信号，数据处理流程如图 5-1 所示。

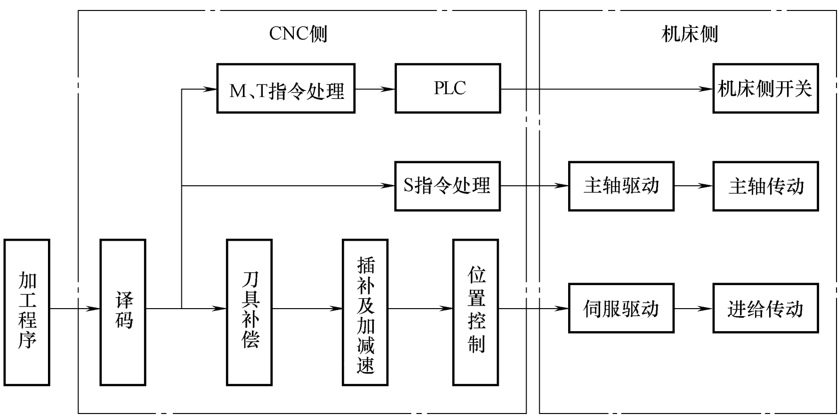


图 5-1　数据处理流程

5.1.1　数据处理

1. 译码

将加工程序输入到数控系统后，数控系统必须对加工程序进行译码，生成数控系统能识别的数据格式，译码结果存放在指定的寄存器器中，如 M 代码寄存器，G 代码寄存器，X、Y、Z 寄存器等，以便供后续数据处理时使用。

译码的一种方式是，在正式加工前一次性地将整个程序翻译完，并在译码过程中对程序进行语法检查；另一种方式是，在加工过程中进行译码，即数控系统在执行当前程序段进行

加工时，利用空闲时间对后面的程序段进行译码并进行后续数据处理，这种方式也称为预读处理，预读的程序段越多，数控系统的数据处理功能也越强。

2. 刀具补偿

加工程序中的编程轨迹是根据工件坐标系建立在零件轮廓上的，而数控系统控制的是刀具中心轨迹，刀具补偿的目的是，数控系统根据编程坐标、刀具半径和长度自动计算出刀具中心的轨迹，经刀具补偿计算得到的坐标值是插补运算的依据。例如：在图 5-2 所示的零件轮廓中，轮廓 A 点坐标为（x_A，y_A），从零件轮廓 1 过渡到轮廓 2 的过程中，数控系统根据刀具半径补偿自动计算出对应的坐标点 A_1（x_{A1}，y_{A1}）和 A_2（x_{A2}，y_{A2}）。

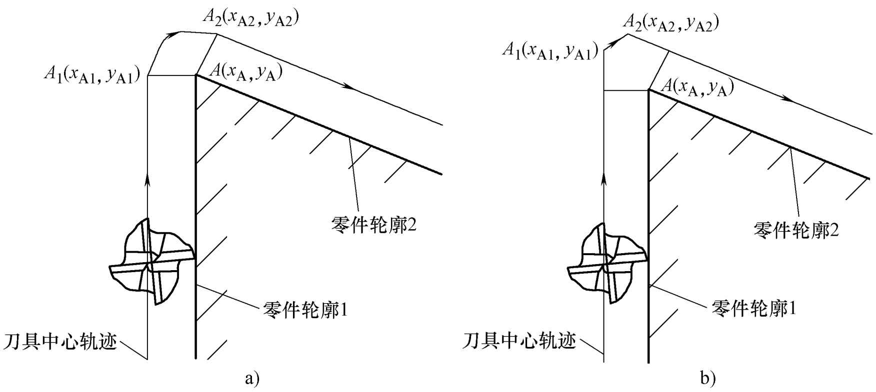


图 5-2　刀具半径补偿

a）拐角圆弧过渡　b）拐角矢量过渡

刀具中心轨迹拐角过渡有圆弧过渡和矢量过渡两种方法。前者，刀具在零件轮廓拐角处始终与零件相接触，容易造成零件拐角处损伤，工艺性较差，但坐标计算较容易；后者，刀具在零件轮廓拐角处不与零件接触，工艺性好，但坐标计算复杂。

刀具补偿有刀具半径补偿和刀具长度补偿两种类型，刀具补偿指令和应用参见第 9 章和第 10 章相关内容的介绍。

3. 插补运算

数控系统根据程序中的轨迹指令（G01、G02、G03）、坐标值（X、Y、Z）及进给速度（F）等信息，按一定的数学算法，实时计算出刀具从起点到终点之间许多个移动点的坐标值，这一计算过程称为插补运算。数控系统通过插补运算输出各坐标轴的进给脉冲或进给增量，并将这些位置坐标值作为位置控制指令，控制刀具按程序规定的轨迹和速度运动，实现切削加工。由插补运算得到的移动点轨迹称为插补轨迹。按零件轮廓编制的加工程序，刀具中心理想轨迹为直线或圆弧，实际上刀具移动的轨迹是插补轨迹，如图 5-3 所示。

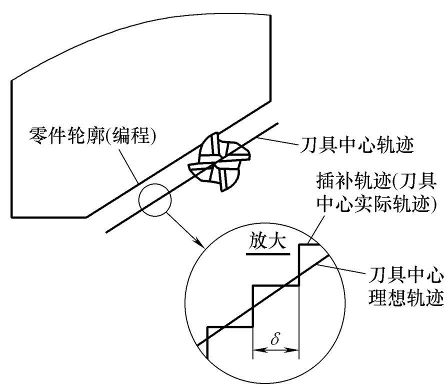


图 5-3　插补轨迹

插补轨迹是由一段段折线组成的，与理想轨迹拟合，尽管两者之间存在误差，但由于脉冲当量 δ（1 个脉冲指令所对应的坐标轴移动量）很小，如 0. 001mm/脉冲，插补轨迹的精度是很高的，完全能

满足数控机床对轮廓加工精度的要求。插补运算有各种方法，如逐点比较插补法、数字积分插补法及数据采样插补法等。

插补运算由数控系统的插补软件，或软件和专用集成电路相结合的方式实现。插补运算是数控系统的核心技术，数控系统都有直线插补和圆弧插补功能，高档数控系统还有空间曲线插补等功能。

5.1.2 控制功能

1. S 指令功能

数控系统根据输入的 S 指令、主轴倍率以及主轴齿轮换档指令，通过系统控制软件计算出主轴电动机的转速，对主轴驱动器输出控制信号。对模拟主轴，输出信号为 0~+10V 的模拟电压；对数字主轴为串行数字信号。

例如：某数控车床采用变频器和三相交流异步电动机组成的模拟主轴，如图 5-4a 所示。主轴通过齿轮换档实现变频调速，主轴电动机与主轴间的低速档传动比为 2，高速档传动比为 0.5，数控系统输出 0~+10V 的速度模拟电压对应主轴电动机转速 0~1470r/min。

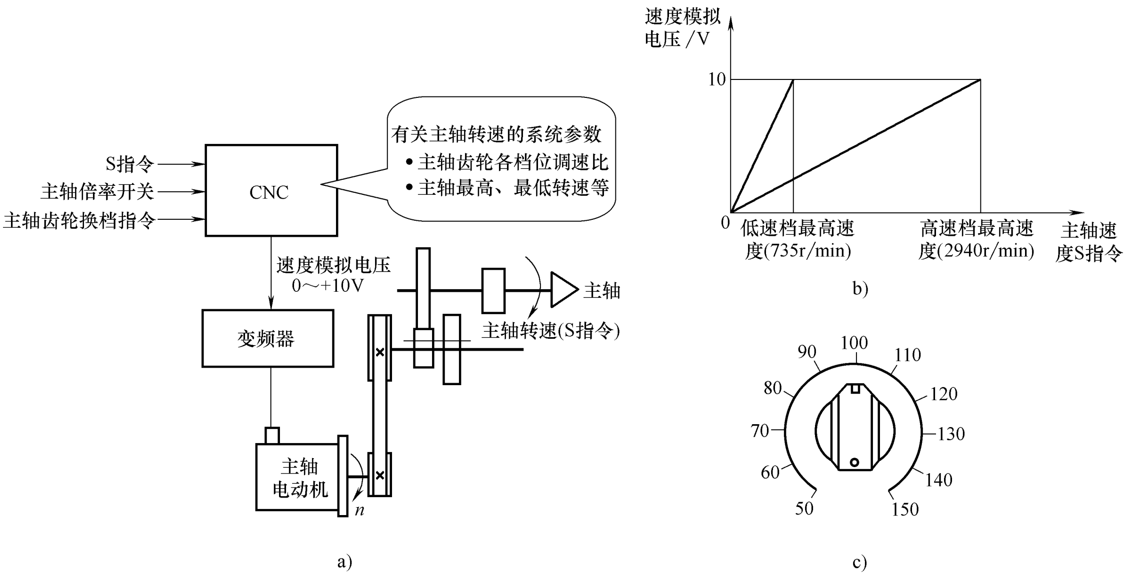


图 5-4　数控车床模拟主轴转速控制

a）组成　b）S 指令与速度模拟电压的关系　c）主轴倍率开关

低速档和高速档对应的主轴最高转速分别为 735r/min 和 2940r/min，如图 5-4b 所示。低速档时，若编程指令为 S500，主轴倍率开关设定为 100%，则数控系统输出 6.8V 的模拟电压给变频器，此时，主轴电动机转速为 1000r/min，主轴转速为 500r/min；高速档时，数控系统则输出 1.7V 的模拟电压给变频器，此时，主轴电动机转速为 250r/min，主轴转速同样为 500r/min。另外，在低速档时，若主轴倍率开关调至 80%（图 5-4c），则数控系统输出 5.4V 的模拟电压，主轴电动机转速为 800r/min，主轴实际转速为 400r/min。

2. 位置伺服控制

位置伺服控制是数控系统最重要的控制内容之一，其控制实质是位置跟随控制，就是用

指令位置与实际位置的偏差来控制移动部件向减小偏差的方向运动，直至实际位置等于指令位置。有关插补运算、位置检测和反馈、伺服系统的组成、伺服性能及调整和优化等都是针对位置控制的，具体内容参见第 6 章的介绍。

3. M、T 指令功能

M、T 指令通过数控系统的 PLC 功能实现机床上的各种辅助功能，M 指令涉及主轴正、反转和停止，切削液开、关，车床液压卡盘夹紧、松开，液压尾座夹紧、松开，主轴齿轮换档以及加工中心换刀等；T 指令涉及车床刀架和加工中心刀库选刀。有关数控机床 PLC 控制参见第 7 章的介绍。

5.2　插补原理

5.2.1　逐点比较插补法

逐点比较插补法就是，在刀具运动过程中，不断比较刀具与零件轮廓之间的相对位置，并根据比较结果向各坐标轴发出进给脉冲，最终获得一个非常接近零件轮廓的插补轨迹。在插补运算过程中，将刀具和零件轮廓等效为动点和理想轨迹，根据直线和圆弧轨迹有直线逐点比较插补法和圆弧逐点比较插补法。

1. 直线逐点比较插补法

（1）偏差函数　以第 I 象限且起点在原点 O，终点为 A（x_e，y_e）的直线插补为例，如图 5-5 所示。

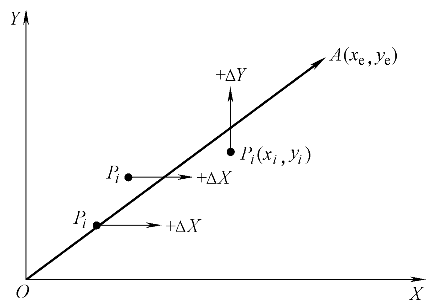


图 5-5　第 I 象限直线逐点比较及进给方向

插补过程中动点 $P_i(x_i, y_i)$ 与理想直线轨迹 OA 之间存在三种情况：

1）动点在直线上，则

$$\frac{y_i}{x_i}=\frac{y_e}{x_e}$$

即

$$x_e y_i - x_i y_e = 0$$

2）动点在直线上方，则

$$\frac{y_i}{x_i}>\frac{y_e}{x_e}$$

即

$$x_e y_i - x_i y_e > 0$$

3）动点在直线下方，则

$$\frac{y_i}{x_i}<\frac{y_e}{x_e}$$

即

$$x_e y_i - x_i y_e < 0$$

令 $F_i = x_e y_i - x_i y_e$，F_i称为偏差函数，则有：

1）当 $F_i \geqslant 0$ 时，表示动点在理想直线轨迹上或上方，则动点向+X 方向走一个脉冲当量+ΔX。

2）当 $F_i<0$ 时，表示动点在理想直线轨迹的下方，则动点向+Y 方向走一个脉冲当量+ΔY。

在上述插补运算方式中，为了简化偏差函数 F_i 的计算，通常采用偏差递推的方式，即根据当前动点的偏差推算出下一点的偏差值。偏差递推过程即为迭代过程。

1）动点在直线上或上方的递推式。设当前动点 $P_i(x_i, y_i)$ 在直线上或上方，则 $F_i \geqslant 0$，动点向 $+X$ 方向进给一个脉冲当量，则新的动点 P_{i+1} 坐标为（x_i+1，y_i），偏差函数 F_{i+1} 为

$$F_{i+1}=x_e y_i-(x_i+1)y_e=x_e y_i-x_i y_e-y_e=F_i-y_e$$

2）动点在直线下方的递推式。设动点 $P_i(x_i, y_i)$ 在直线下方，则 $F_i<0$，动点向 $+Y$ 方向进给一个脉冲当量，则新的动点 P_{i+1} 坐标为（x_i，y_i+1），偏差函数 F_{i+1} 为

$$F_{i+1}=x_e(y_i+1)-x_i y_e=x_e y_i-x_i y_e+x_e=F_i+x_e$$

（2）插补四节拍及插补流程　在逐点比较插补法中，每进给一步都要完成四个工作节拍，即偏差判别、坐标进给、偏差计算及终点判别。直线逐点比较第Ⅰ象限插补流程如图 5-6 所示。

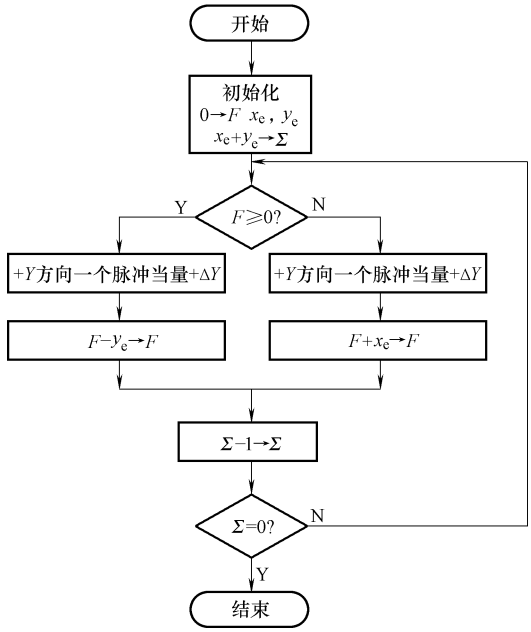


图 5-6　直线逐点比较第Ⅰ象限插补流程

当插补结束时，动点必到达终点坐标，且终点偏差函数值为零。

【例 5-1】　设终点坐标（x_e，y_e）为（6，4），插补计算见表 5-1。

表 5-1　直线插补计算

步数	偏差判别	坐标进给	偏差计算	终点判别
第①步	$F_0=0$	$+\Delta X$	$F_1=F_0-y_e=0-4=-4$	$\Sigma=10-1=9$
第②步	$F_1<0$	$+\Delta Y$	$F_2=F_1+x_e=-4+6=2$	$\Sigma=9-1=8$
第③步	$F_2>0$	$+\Delta X$	$F_3=F_2-y_e=2-4=-2$	$\Sigma=8-1=7$
第④步	$F_3<0$	$+\Delta Y$	$F_4=F_3+x_e=-2+6=4$	$\Sigma=7-1=6$
第⑤步	$F_4>0$	$+\Delta X$	$F_5=F_4-y_e=4-4=0$	$\Sigma=6-1=5$
第⑥步	$F_5=0$	$+\Delta X$	$F_6=F_5-y_e=0-4=-4$	$\Sigma=5-1=4$
第⑦步	$F_6<0$	$+\Delta Y$	$F_7=F_6+x_e=-4+6=2$	$\Sigma=4-1=3$
第⑧步	$F_7>0$	$+\Delta X$	$F_8=F_7-y_e=2-4=-2$	$\Sigma=3-1=2$
第⑨步	$F_8<0$	$+\Delta Y$	$F_9=F_8+x_e=-2+6=4$	$\Sigma=2-1=1$
第⑩步	$F_9>0$	$+\Delta X$	$F_{10}=F_9-y_e=4-4=0$	$\Sigma=1-1=0$

经插补计算得到的插补轨迹如图 5-7 所示。

当直线处于第Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ象限时，其偏差判别和坐标进给如图 5-8 所示。另外，当直线起点不在原点，且处于跨象限位置时，首先以直线起点为原点设置一个新的坐标系，再判断直线在新坐标系中所处的象限，然后根据各象限的偏差函数进行偏差计算和坐标进给，如图 5-9 所示。

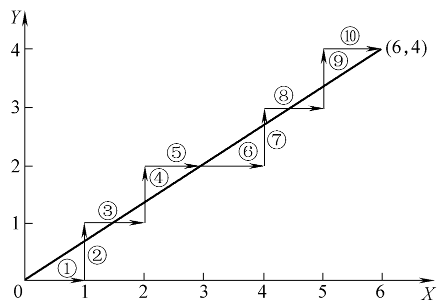


图 5-7　插补轨迹

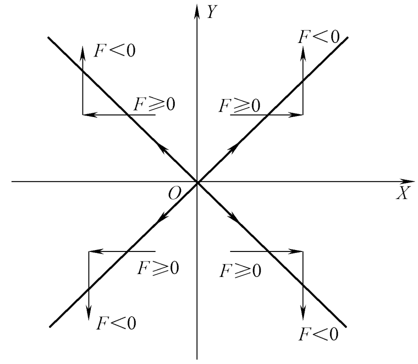


图 5-8　四象限直线插补偏差判别和坐标进给

图 5-9 中，直线 AB 在 X-Y 坐标系中处于第Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ象限中。以起点 A 为新的坐标原点建立 X'-Y'坐标系，则直线 AB 在 X'-Y'坐标系中处于第Ⅰ象限，B 点作为终点，其坐标值更新为（x_B-x_A）和（y_B-y_A）。这样，直线 AB 就可调用第Ⅰ象限的插补法则进行偏差计算和坐标进给。

2. 圆弧逐点比较插补法

以第Ⅰ象限且圆心在原点，起点为 $A(x_s, y_s)$、终点为 $B(x_e, y_e)$，半径为 R 的逆时针方向圆弧插补为例，如图 5-10 所示。

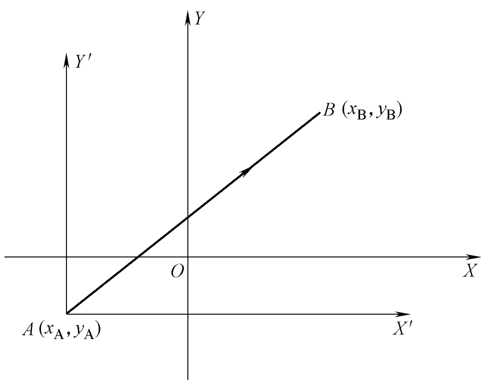


图 5-9　直线插补坐标系设置

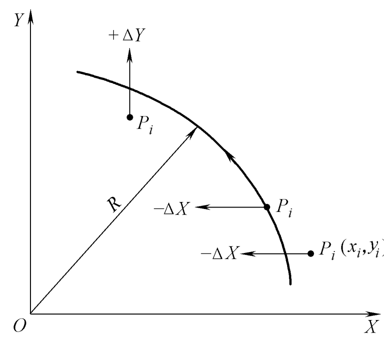


图 5-10　第Ⅰ象限逆时针方向圆弧逐点比较及进给方向

动点 $P_i(x_i, y_i)$ 与理想圆弧轨迹 AB 之间存在三种情况，即圆弧上、圆弧外和圆弧内。通过动点和原点间的距离与半径 R 比较，得到偏差函数 $F_i=(x_i^2+y_i^2)-R^2$。

1）当 $F_i\geqslant 0$ 时，表示动点在理想圆弧轨迹上或外侧，动点向$-X$ 方向走一个脉冲当量。

2）当计算结果 $F_i<0$ 时，表示动点在理想圆弧轨迹内侧，动点向$+Y$ 方向走一个脉冲当量。

动点在圆弧上或外侧的偏差函数递推式为 $F_{i+1}=F_i-2x_i+1$；动点在理想圆弧轨迹内侧偏差函数递推式为 $F_{i+1}=F_i+2y_i+1$。在圆弧偏差函数递推过程中，每进行一次偏差计算，都要对动点坐标 $P_i(x_i, y_i)$ 进行一次计算。

【例 5-2】 逆时针方向圆弧 AB 在第Ⅰ象限，且圆心在原点，起点为 A(5，1)，终点为 B(1，5)。根据逐点比较四节拍计算结果，得到其插补轨迹如图 5-11 所示。

四象限圆弧逐点比较插补偏差判别和进给如图 5-12 所示。

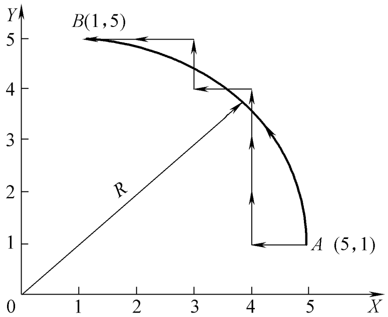


图 5-11 圆弧逐点比较插补轨迹

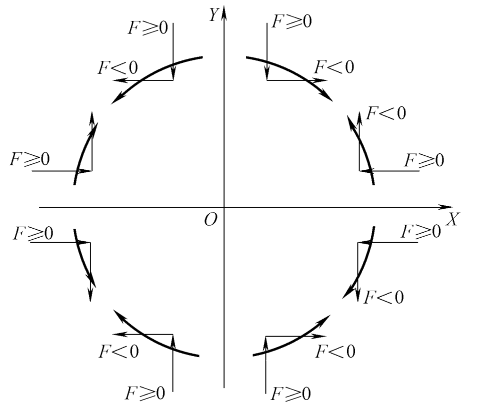


图 5-12 四象限圆弧逐点比较插补偏差判别和进给

逐点比较插补运算由硬件或软件实现，逐点比较插补运算的结果就是不断地向各坐标轴发出位置指令脉冲，通常用于配置步进驱动的数控系统中。位置开环控制中的逐点比较插补法如图 5-13 所示。

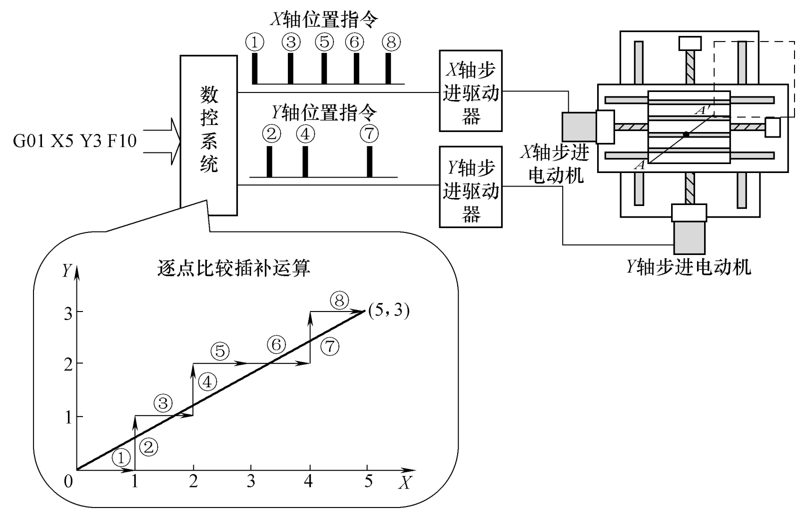


图 5-13 位置开环控制中的逐点比较插补法

数控系统对输入的程序指令进行逐点比较插补运算后，输出 X 轴和 Y 轴的进给脉冲作为位置指令，经 X 轴和 Y 轴步进驱动器功率放大后，驱动 X 轴和 Y 轴步进电动机，带动 X 轴和 Y 轴滚珠丝杠，通过两轴联动，使工作台从 A 点运动到 A'点，达到程序指令所规定的位置，如图中虚线所示。

另外，还有一种数字积分插补法（也称为 DDA），其插补算法是建立在数字积分器上的，通过累加器的溢出脉冲作为坐标轴的进给脉冲，易于实现多坐标的插补联动。

5.2.2　数据采样插补法

数据采样插补法就是用一定的轮廓步长来拟合轮廓轨迹，在一个插补周期内计算出各个坐标轴的进给增量，并计算出下一个插补点的坐标值。轮廓步长 l(μm) 与进给速度 F(mm/min)和插补周期 T(ms) 有关，即

$$l=\frac{FT}{60}$$

插补周期包括插补计算时间、位置采样时间、显示及监控时间等。数控系统插补周期通常为 8ms 左右。

1. 直线数据采样插补法

如图 5-14 所示，设理想直线轨迹 OA 与 X 轴的夹角为 α，已知终点坐标 A（x_e，y_e），则

$$\alpha=\arctan\frac{y_e}{x_e}$$

用轮廓步长 l 拟合直线轨迹时，X 轴、Y 轴坐标增量 ΔX、ΔY 分别为

$$\Delta X=l\cos\alpha$$

$$\Delta Y=l\sin\alpha$$

若动点当前位置为 P_i（x_i，y_i），则动点下一位置 P_{i+1}（x_{i+1}，y_{i+1}）为

$$x_{i+1}=x_i+\Delta X$$
$$y_{i+1}=y_i+\Delta Y$$

直线数据采样插补法中，因为轮廓步长与直线轨迹重合，所以直线插补轨迹没有误差。

2. 圆弧数据采样插补法

圆弧数据采样插补法中，用轮廓步长 l 作为圆弧弦长来拟合圆弧轨迹，如图 5-15 所示。

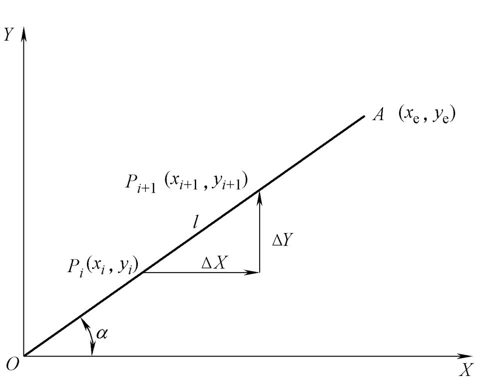


图 5-14　直线数据采样插补

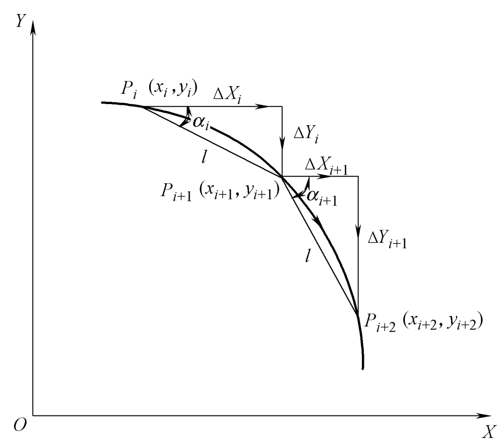


图 5-15　圆弧（顺时针方向）数据采样插补

因为每次插补计算时，轮廓步长 l 与 X 轴的夹角 α 不同，所以 X 轴、Y 轴坐标增量 ΔX、ΔY 也不同。以图 5-13 中的顺时针方向圆弧为例，设动点当前位置为 P_i（x_i，y_i），轮廓步

长 l 与 X 轴的夹角为 α_i，则

$$\alpha_i \approx \arctan \frac{x_i + \frac{1}{2} l\cos\alpha_i}{y_i - \frac{1}{2} l\sin\alpha_i}$$

将 $\cos\alpha_i$ 和 $\sin\alpha_i$ 用 cos45°和 sin45°代替，则 α_i 近似为

$$\alpha_i \approx \arctan \frac{x_i + \frac{1}{2} l\cos 45°}{y_i - \frac{1}{2} l\sin 45°}$$

动点在当前位置 P_i（x_i，y_i）的 X 轴、Y 轴坐标增量 ΔX_i、ΔY_i 分别为

$$\Delta X_i = l\cos\alpha_i$$
$$\Delta Y_i = l\sin\alpha_i$$

则动点下一位置 P_{i+1}（x_{i+1}，y_{i+1}）为

$$x_{i+1} = x_i + \Delta X_i$$
$$y_{i+1} = y_i - \Delta Y_i$$

数据采样插补通常由软件实现，通常用于有位置检测和反馈，且配置伺服电动机驱动的数控系统，组成闭环或半闭环伺服系统，如图 5-16 所示。

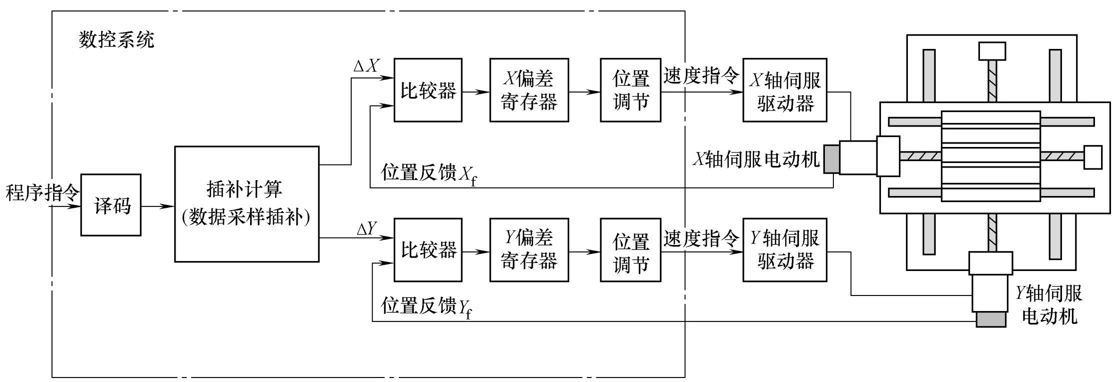


图 5-16　位置闭环/半闭环控制中的数据采样插补法

程序指令经译码和插补运算生成 X 轴和 Y 轴位置增量 ΔX 和 ΔY 作为位置指令，在一个插补周期内分别与位置反馈 X_f 和 Y_f（由编码器或光栅检测获得）比较，得到位置偏差并存入偏差寄存器中，经位置调节控制得到速度指令，再经 X 轴和 Y 轴伺服驱动器和伺服电动机带动滚珠丝杠，使工作台两轴联动，实现插补轨迹的运动；工作台运动时，位置偏差不断减小，当位置偏差为零时，工作台到达程序指令所规定的位置。

5.2.3　加减速处理

为了保证进给传动在起动和停止时不产生冲击、失步或振荡，必须对插补运算得到的脉冲频率进行加减速控制。在进给起动时，脉冲频率按一定的方式逐渐增加，其快慢用加速时间来表示；进给停止时，脉冲频率按一定的方式逐渐减小，其快慢用减速时间来表示。加减

速的方式有线型加减速、指数型加减速和 S 型加减速，如图 5-17 所示。

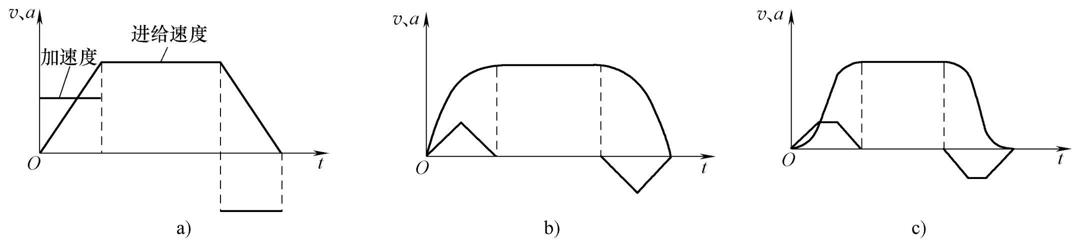


图 5-17　加减速方式

a）线型加减速　b）指数型加减速　c）S 型加减速

线型加减速响应快，但加速度有突变，进给起动加速或减速停止，均会对机械传动产生冲击；指数加减速时，加速度随进给速度变化，加减速时机械传动较平稳；S 型加减速结合了线型和指数型加减速的优点。

加减速控制由软件实现。加减速控制可以在插补前进行，称为前加减速控制；也可以在插补后进行，称为后加减速控制，如图 5-18 所示。

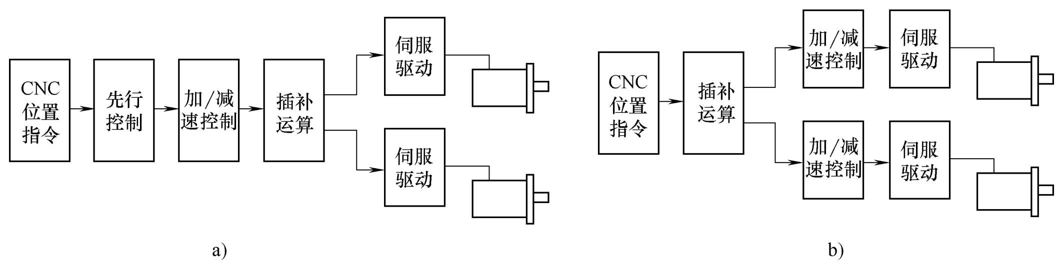


图 5-18　加减速控制

a）前加减速控制　b）后加减速控制

前加减速控制时，数控系统对指令速度 F 进行加减速控制，能保证位置控制精度，但需要预测减速点，称为先行控制，预测减速点的计算量较大；后加减速控制时，数控系统分别对各轴进行加减速控制，不需要预测减速点，在加减速阶段位置控制有误差。

5.3　数控系统的组成

5.3.1　数控系统的软硬件

1. 软硬件的功能

在数控系统中，软件和硬件在逻辑上是等效的，即由硬件完成的工作原则上也可以由软件来完成。但软件和硬件各有不同的特点，硬件处理速度快，但灵活性和适应性较差，造价相对较高；软件设计灵活，适应性强，但处理速度相对较慢。图 5-19 所示为数控系统软硬件承担功能任务的三种方案。

数控系统中实时性要求最高的任务就是插补和位置控制，若这两种任务都由硬件实现，则称为完全插补器（第一种方案）；若分别由软硬件实现，则称为软硬件插补器（第二种方

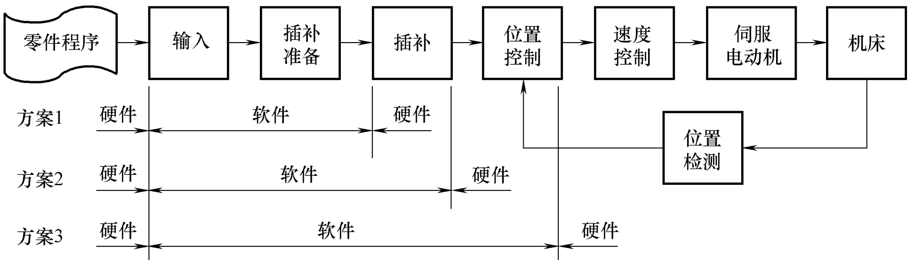


图 5-19　数控系统软硬件承担功能任务的三种方案

案）；若均由软件实现，则称为完全软件插补器（第三种方案）。从第一种到第三种方案，随着计算机运算处理能力的不断增强，软件的实时处理能力大大提高，软件所承担的任务越来越多，这是当前数控技术发展的趋势，即用相对较少且标准化程度高的硬件，配以功能丰富的软件模块。

2. 数控系统的结构

（1）封闭式专用型结构　数控系统的硬件由各制造厂专门设计和制造，具有结构紧凑、布局合理和专用性强的特点，但硬件之间彼此不能交换和替代，通用性较差。目前，这类数控系统占据了制造业的大部分市场，如 FANUC 0/0i 系列数控系统等。

（2）开放式结构

1）PC 嵌入 NC 式结构。将专用结构的 CNC 部分和 PC（个人计算机）结合在一起，将非实时控制部分改由 PC 来承担，实时控制部分仍使用专用的 CNC 技术，使系统具有较好的开放性，大大改善了数控系统的人机界面、图形显示、切削仿真、网络通信及编程和诊断等功能。典型的数控系统如西门子 840D/Dsl 系统等。

2）NC 嵌入 PC 式结构。其本质是基于运动控制器的开放式数控系统，一些以 PC 为基础的 CNC 制造商，生产各种高性能的运动控制卡和运动控制软件，由此开发的 CNC 系统由运动控制卡和 PC 构成。运动控制卡通常选用高速 DSP 作为 CPU，具有很强的运动控制和 PLC 控制能力，其开放的接口函数库可供用户在 Windows 平台下自行开发并构建所需的数控系统，典型的如用美国 DeltaTau 公司的 PMAC 多轴运动控制卡构建的数控系统等。

3）软件型开放式结构。这是一种最新型开放式体系结构的数控系统，随着计算机 CPU 速度的提高和基于 Windows NT/Linux 等实时操作系统的广泛应用，数控系统所有的数控功能，如插补、位置控制等全部由计算机软件来代替硬件，且软件化的伺服接口和 I/O 接口仅是计算机与伺服驱动器和外部 I/O 之间的标准化通用接口。软件型开放式数控系统是当今及今后开放式数控系统的发展趋势。

5.3.2　数控系统硬件

1. 单微处理器数控系统

在单微处理器数控系统（图 5-20）中，整个系统只有一个中央处理器（CPU），CPU 采用集中控制和软件实时调度的方式，分时处理译码、刀具补偿、插补、位置控制、加工过程监控及显示等各个任务。

单微处理器数控系统通常采用总线结构，包括数据总线、地址总线和控制总线。数据总线在各控制装置间传送数据；地址总线与数据总线结合使用，以确定数据总线上传输的数据

来源地和目的地；控制总线传输的是管理总线的控制信号。

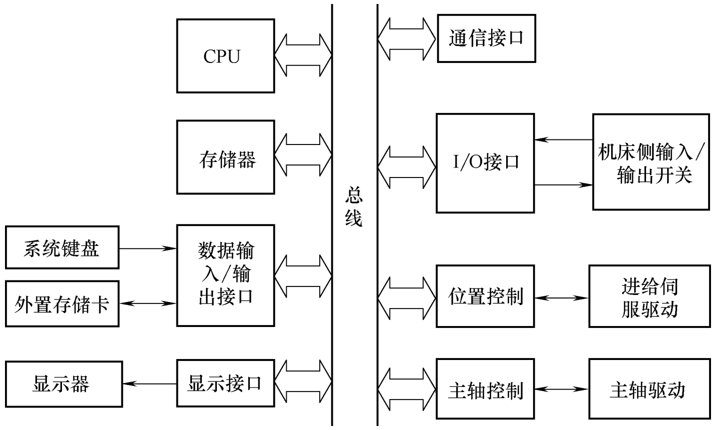


图 5-20　单微处理器数控系统

存储器用于存储数据和程序，包括只读存储器（ROM）和随机存储器（RAM）。系统程序存放在 ROM 中，由生产厂家固化，即使系统断电，控制程序也不会丢失；系统控制程序只能由 CPU 读出，不能随意写入。数据处理的中间结果、需要显示的数据，以及运行中的状态等存放在随机 RAM 中，它可以随时读出和写入，断电后信息丢失；零件加工程序、机床参数和刀具参数等存放在有后备电池的 RAM 中，这些数据可以随时读出，也可以根据操作需要写入或修改，系统断电后由后备电池保持这些数据。

CPU 由运算器和控制器组成。运算器将运算结果存放到存储器中，通过将运算结果进行判断，设置状态寄存器的相应状态；控制器从存储器中依次取出程序指令，向各控制装置发出执行操作的控制信号，使指令得以执行，同时接收执行装置发回来的反馈信号，决定下一步的命令操作。

2. 多微处理器数控系统

多微处理器数控系统是将控制任务划分为各个模块，每个模块由一个独立的微处理器来控制，系统通过各模块之间的相互协调来完成对机床的控制。与单微处理器数控系统相比，多微处理器数控系统的运算速度有了很大的提高，适用于多轴控制、高进给速度、高精度和高效率的数控系统。多微处理器的功能模块包括：

（1）管理模块　用于管理和组织整个数控系统的工作，主要包括初始化、中断管理、总线裁决、系统出错识别和处理、系统软硬件诊断等功能。

（2）插补模块　主要是完成插补前的预处理，如对零件程序的译码、刀具半径补偿、坐标位移量计算、进给速度处理等；进行插补计算，为各个坐标提供位置给定值。

（3）位置控制模块　用来进行位置给定值与位置实际值的比较，经位置调节，输出速度指令以驱动进给电动机。

（4）存储器模块　存储器模块为程序和数据的主存储器，或为功能模块间进行数据传送的共享存储器。

（5）PLC 功能模块　它对零件程序中的开关功能和机床来的信号进行逻辑处理，实现机床电气设备的开关控制。

（6）操作面板及显示模块　这个模块包括零件程序、参数和数据、各种操作命令的输入/输出及显示所需要的各种接口电路。

多微处理器数控系统中各模块之间的互联和通信主要采用共享总线和共享存储器两类结构。

（1）多微处理器共享总线结构　在共享总线结构中，各功能模块插在配有总线插座的

机箱内，由系统总线把各个模块有效地连接在一起，按照要求交换各种控制指令和数据，实现各种预定的功能，图 5-21 所示为多微处理器共享总线结构。

在共享总线结构中，若多个模块同时请求使用总线，则会产生竞争总线的问题。为此，系统设有总线总裁电路，该电路在多个模块争用总线而发生冲突时，能够判别出发生冲突的各个模块的优先级别，最后决定让优先级别高的模块使用总线。

（2）多微处理器共享存储器结构　在共享存储器结构中，各模块通过共享存储器互相交换信息共享存储器直接挂在系统总线上，各模块都能访问。图 5-22 所示为多微处理器共享存储器结构。

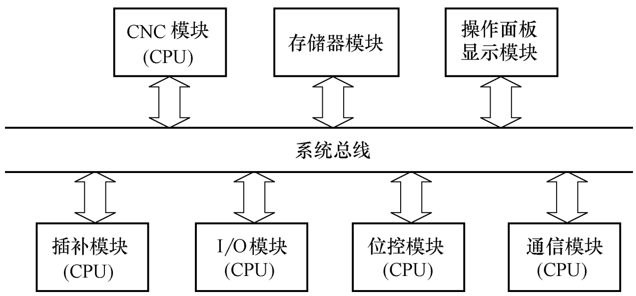


图 5-21　多微处理器共享总线结构

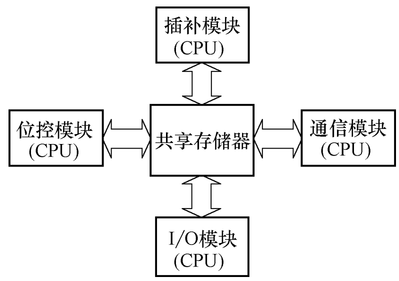


图 5-22　多微处理器共享存储器结构

共享存储器结构中，多个模块共享存储器时，引起冲突的可能性较小，数据传输效率较高；当系统扩展的模块增加时，往往会由于争用共享而造成数据传输的阻塞，降低系统效率。

5.3.3　数控系统软件

1. 数控系统软件的任务

数控系统是典型的多任务控制系统，系统软件具有多任务性和实时性的特点。

（1）多任务性　系统软件从功能上分有管理软件和控制软件，软件功能分解如图 5-23 所示。

在许多情况下，管理和控制的某些工作必须同时进行。例如：为了使操作人员及时了解当前加工的坐标值，管理软件中的刀具位置显示功能和控制软件中的位置控制功能必须同时进行。同样地，在控制软件运行时，其本身的一些功能也必须同时运行。例如：为了保证加工过程的连续性，译码、刀具补偿和速度处理要同时进行，而插补运算又必须与位置控制同时进行。

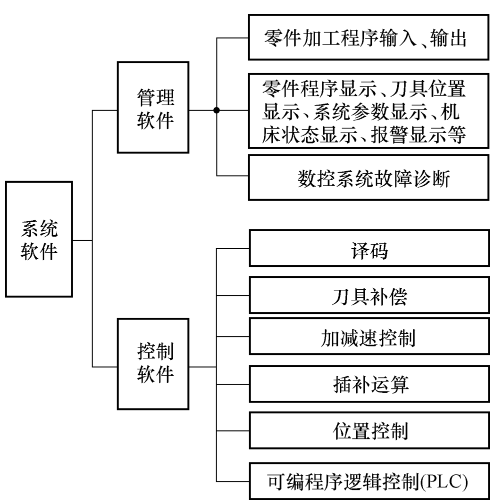


图 5-23　功能软件分解

（2）实时性

1）实时突发性任务。任务的发生具有随机性和突发性，主要包括故障中断（急停、机械限位和硬件故障等）、机床 PLC 故障、按键操作中断等。

2）实时周期性任务。在精确的时间间隔内执行任务，主要包括插补运算、位置控制等任务，在任务执行过程中，除系统故障外，不允许被其他任务中断。

3）弱实时性任务。这类任务对实时性的要求较低，包括显示器、零件程序编辑、加工状态动态显示等。

2. 数控系统软件组成

数控系统软件包括三部分：

第一部分由数控系统生产厂家研制的启动芯片、基本系统程序、加工循环及测量循环等组成。这部分软件预先写入 ROM 中，安全级别很高，这部分软件若受到意外破坏，应注意所使用的数控系统型号和软件版本号，及时与数控系统的生产厂家取得联系，要求更换或复制软件。

第二部分由机床制造厂编制，针对具体机床所用的机床参数、PLC 用户程序及报警文本等组成。这部分软件由机床制造厂写入 RAM 和 ROM 中，并且提供相关的技术资料，以便机床用户在调试和故障诊断时使用。另外，由于 RAM 数据的易失性，机床用户可以对这部分软件进行备份和恢复。

第三部分由机床用户编制的加工程序、刀具补偿参数、零点偏置参数等组成。这部分软件存储于系统 RAM 中，机床用户可以对这部分软件进行备份和恢复。

5.3.4　数控系统的网络化

现代数控系统的控制信号、检测信号及加工程序都已数字化，具备了数字化信息传输、存储的条件，同时，数控系统有基于以太网和 TCP/IP 的通信标准，不同品牌的数控系统可通过网络连接在一起，实现网络化的数字制造。

1. 通过串口实现联网

一般数控系统都带有 RS232 串行通信接口，通过 RS232 可将各机床的数控系统连接起来，如图 5-24 所示。

图 5-24 中，监控计算机一方面通过 RS232 接口与数控系统进行通信，实现加工程序的分配；另一方面，监控计算机通过局域网与工作站交互，实现生产调度管理。这种形式的联网速度较慢，一般数据传输速度只有 9600bit/s，只能进行数控程序和一般参数的传递，不能对加工过程进行监控。

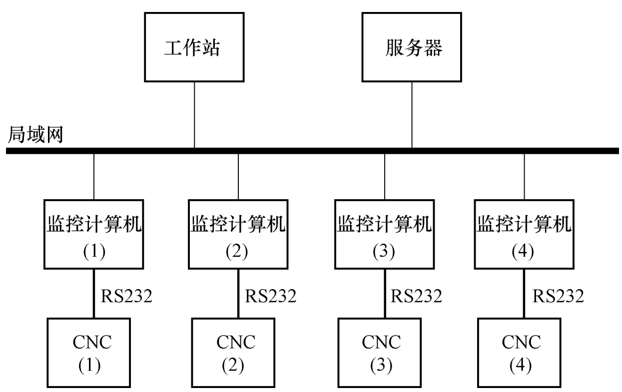


图 5-24　由 RS232 连接的数控系统网络

2. 通过现场总线实现联网

现场总线采用全数字式通信，具有开放式、全分布及可互操作等特点。由现场总线组成的数控系统网络如图 5-25 所示。

在现场总线网络中，一根总线将全部控制设备连接在一起，通过总线进行信息交互，组成设备层控制网，现场总线大大降低了系统的成本和组网的复杂性。由现场总线组成的网络中，根据信息类型和对通信的要求，将设备层控制网和上层管理网分开，管理网采用局域网，以完成大容量及实时性要求不高的调度管理、CAD/CAM 和生产计划等数据的通信。

3. 通过局域网实现联网

随着数控系统开放体系结构智能化技术的不断发展，数控系统也具有了以太网组网功能，如图 5-26 所示。

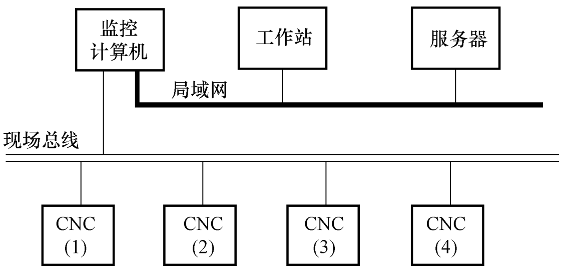


图 5-25　由现场总线组成的数控系统网络

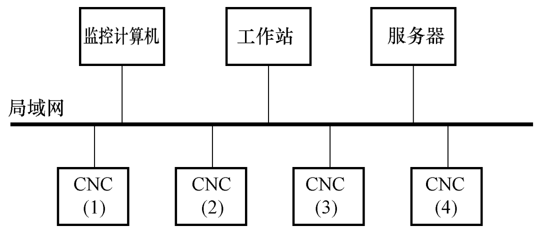


图 5-26　由局域网组成的数控系统网络

具有以太网功能的数控系统可实现与其他数控系统及上层计算机之间的通信，在保持大信息量通信的同时，还发挥数控系统自主性和管理决策的功能。

5.4　典型数控系统介绍

5.4.1　FANUC 0iC 系统

1. 系统接口及定义

FANUC 0iC 系统（图 5-27）是具有总线控制的一体式数控系统，即系统控制单元与显示器和系统面板一体化。

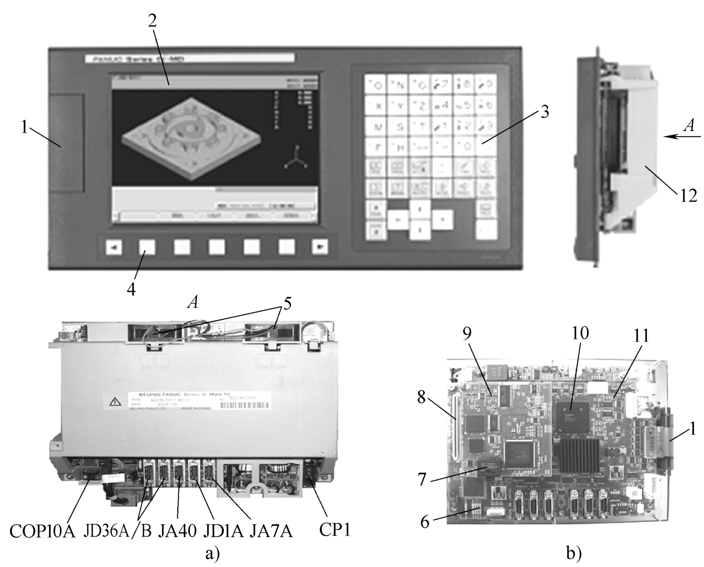


图 5-27　FANUC 0iC 系统

a）系统外观　b）系统主板（卸掉保护罩后）

1—PCMCIA 存储卡插槽　2—系统显示器　3—系统操作面板（MDI）　4—系统软键　5—系统冷却风扇　6—状态及报警指示灯（LED）　7—伺服串行总线（FSSB）　8—扩展槽　9—伺服模块（下层为 FROM/SRAM 模块）　10—CPU　11—系统主板　12—保护罩

系统正面是显示器和系统操作面板，简称 CRT/MDI，背面是系统主板。FANUC 0iC 系统为模块化结构，集成度高。主板上除了主 CPU 及外围电路之外，还集成了 FROM 和 SRAM 模块、PMC 模块、主轴模块及伺服模块等。图 5-28 所示为 FANUC 0iC 系统的结构组成。

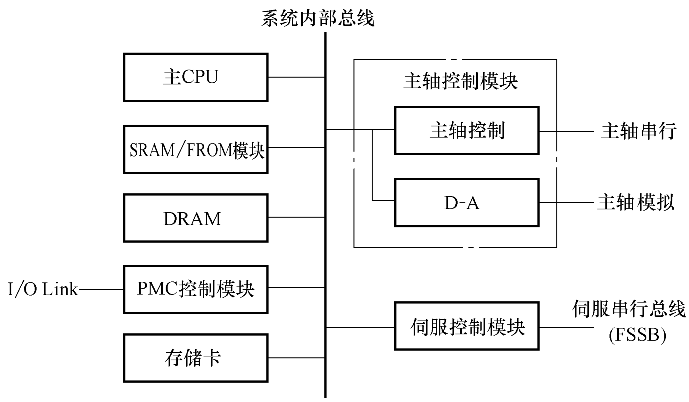


图 5-28　FANUC 0iC 系统的结构组成

图中，主 CPU 完成数据管理、系统内部总线控制及通信控制等；SRAM 是静态随机存储器，存放用户文件（系统参数、丝杠螺距补偿值、宏程序、PMC 参数和加工程序等），系统断电后，SRAM 中的数据需要用锂电池保护；DRAM 是动态随机存储器，作为系统的主存储器，DRAM 通过电容来存储信息，系统断电后数据即消失。SRAM 和 DRAM 负责直接与 CPU 交换指令和数据，SRAM 作为 CPU 和 DRAM 之间的缓存；存储卡是外部存储介质，可对系统数据进行备份和还原；主轴模块负责主轴转速及位置控制，对外控制信号有两种类型，一是与 FANUC 主轴驱动器进行串行总线通信，称为串行主轴，二是输出速度模拟电压信号，称为模拟主轴；伺服模块（又称轴控制卡）上有 DSP（数字信号处理器），负责插补运算、位置控制，通过伺服串行总线与 FANUC 伺服驱动器进行通信；PMC 模块负责机床辅助功能的控制，一方面，通过 I/O Link 总线与 FANUC I/O 模块进行通信，另一方面，通过系统内部总线与主 CPU 进行通信。0iC 系统扩展功能板有串行通信功能板、以太网板、高速串行总线功能板、数据服务器功能板，0iC 系统在基本单元的基础上可选择两个扩展功能板，0i Mate C 系统只有基本单元无扩展功能板。FANUC 0iC 系统的接口有：

COP10A：FANUC 伺服串行总线（FSSB）接口，通过光纤外接 FANUC 伺服驱动器。

JD36A/JD36B：RS232 通信接口，与外部计算机通信。

JA40：模拟主轴速度控制信号接口，速度模拟电压（0~+10V）给定，外接主轴驱动器，如变频器等。

JD1A：I/O Link 接口，外接 FANUC I/O 模块，如外接机床操作面板、外置 I/O 单元、分线盘 I/O 模块及 I/O Link 轴等。

JA7A：串行主轴总线/主轴编码器接口。串行主轴时，该接口通过串行电缆与 FANUC 主轴驱动器连接；模拟主轴时，该接口与机床主轴上的编码器电缆连接。

CP1：外接 DC24V 电源输入。

2. 系统功能

1）FSSB 是以光导纤维为传输介质的串行通信，CNC 通过 FSSB 将多个伺服驱动器连接

起来，实现高速数据通信，提高了可靠性。另外，与光栅连接的分离型位置检测器也通过FSSB与系统进行数据通信。

2）通过以太网实现远程在线加工和现场管理，构建加工车间与工厂技术及生产管理等部门之间进行数据交换的生产系统，用一台中央计算机集中管理多台数控机床，监控机床的运行状态、程序传输等。FANUC 系统以太网有两种配置形式：一种是内置以太网板，实现远程计算机在线加工；另一种是数据服务器功能板，实现远程存储在线加工。

3）主轴驱动根据实际需要有串行主轴和模拟主轴两种配置方式可选择。

4）高速数据传输的 FANUC I/O Link 总线 PMC 控制功能。I/O Link 将各类 I/O 设备连接到 PMC 的 I/O 总线上，包括标准机床操作面板、操作盘 I/O 模块、外置 I/O 单元、分线盘 I/O 模块以及 I/O Link 伺服单元等。

5）通过存储卡或计算机对系统数据进行备份和还原，也可以实现存储卡在线加工。

6）通过伺服调整卡和软件（SERVO GUIDE）优化伺服参数，使伺服系统获得最佳运行特性。

5.4.2 FANUC 0iD 系统

在 FANUC 0iC 系统的基础上，FANUC 0iD 系统在硬件和软件上有了进一步的提高，表现为：

1）采用更高速的 CPU，提高了 CNC 的处理速度。

2）标准配置嵌入式以太网，通过网口 CNC 可以与个人计算机连接，传输加工程序和监视 CNC 的状态。

3）实现了纳米插补，结合高速、高精度的伺服控制，获得光滑的加工表面。

4）将常用的 PMC 程序模块化，简化了 PMC 程序设计。

适用于数控车床的 FANUC 0iTD 系统有 2 个通道，CNC 轴数为 8 轴、2 主轴，联动轴数为 4 轴；适用于数控铣床和加工中心的 FANUC 0iMD 系统有 1 个通道，CNC 轴数为 5 轴、2 主轴，联动轴数为 4 轴。FANUC 0iD 的简化版 FANUC 0iMateD 有 1 个通道，CNC 轴数为 3 轴、1 主轴，联动轴数为 3 轴。图 5-29 所示为 FANUC 0iD 系统背面接口。

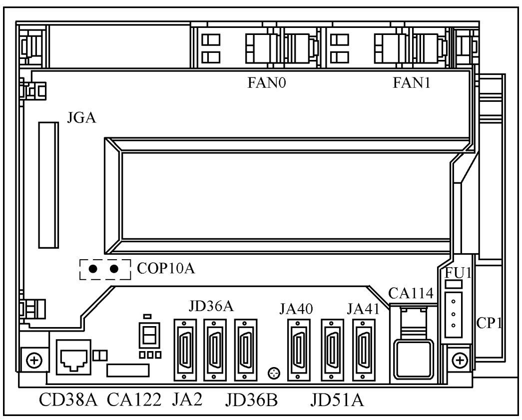


图 5-29　FANUC 0iD 系统背面接口

系统接口：

CP1：系统电源输入（DC 24V）。

FU1：电源输入熔断器。

CA114：系统数据保持电池（锂电池 3V）。

JA2：系统 MDI 键盘接口。

JD36A：RS232C 串行接口 1。

JD36B：RS232C 串行接口 2。

JA40：模拟量主轴速度信号/高速跳转信号接口。

JD51A：I/O Link 总线信号接口。

JA41：串行主轴接口/主轴编码器信号接口。

CA122：系统软键接口。

CD38A：内嵌式以太网接口（FANUC 0iMateD 系统没有）。

COP10A：伺服串行总线（FSSB）接口。

JGA：系统扩展板功能接口（FANUC 0iMateD 系统没有），选择数据服务器、网络总线接口（FANUC 0iD 系统有 PROFIBUS 总线板选择）。

FAN0、FAN1：系统散热风扇。

5.4.3　系统配置

1. FANUC 0i-MC 系统配置

图 5-30 所示为 FANUC 0i-MC 系统配置示意图，图 5-31 所示为 FANUC 0i-MC 系统连接。

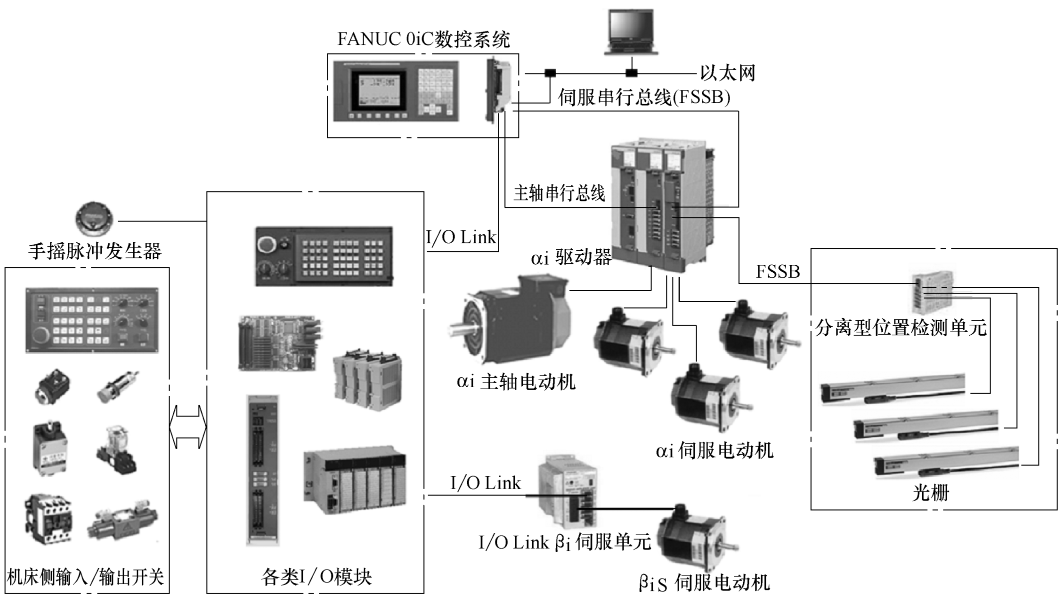


图 5-30　FANUC 0i-MC 系统配置

1）FANUC 0i-MC 系统适用于数控铣床和加工中心等，具备 5 轴控制功能和 4 轴联动。系统功能有 A 包和 B 包两种选择。

2）主轴及进给驱动。系统 A 包标准为 αi 系列伺服驱动模块，αi 系列主轴电动机和伺服电动机；系统 B 包标准为 βi 系列驱动器，βiS 系列主轴电动机和伺服电动机。

3）I/O 装置。可以选择标准机床操作面板模块、操作盘 I/O 模块、分线盘 I/O 模块、外置 I/O 单元及 I/O UNIT A/B 模块等。

4）机床操作面板。可以选择标准机床操作面板模块，也可以选择机床厂开发的、针对机床控制特点的操作面板。

5）I/O Link 轴。为系统的选择配置，常用于加工中心刀库的选刀控制。I/O Link 轴由 PMC 控制，不参与伺服轴的联动控制。I/O Link 轴需要 I/O Link βi 系列伺服单元和 βiS 系列伺服电动机，最多可选择 8 根 I/O Link 轴。

6）系统采用位置闭环伺服控制时，通过伺服串行总线（FSSB）连接分离型位置检测单

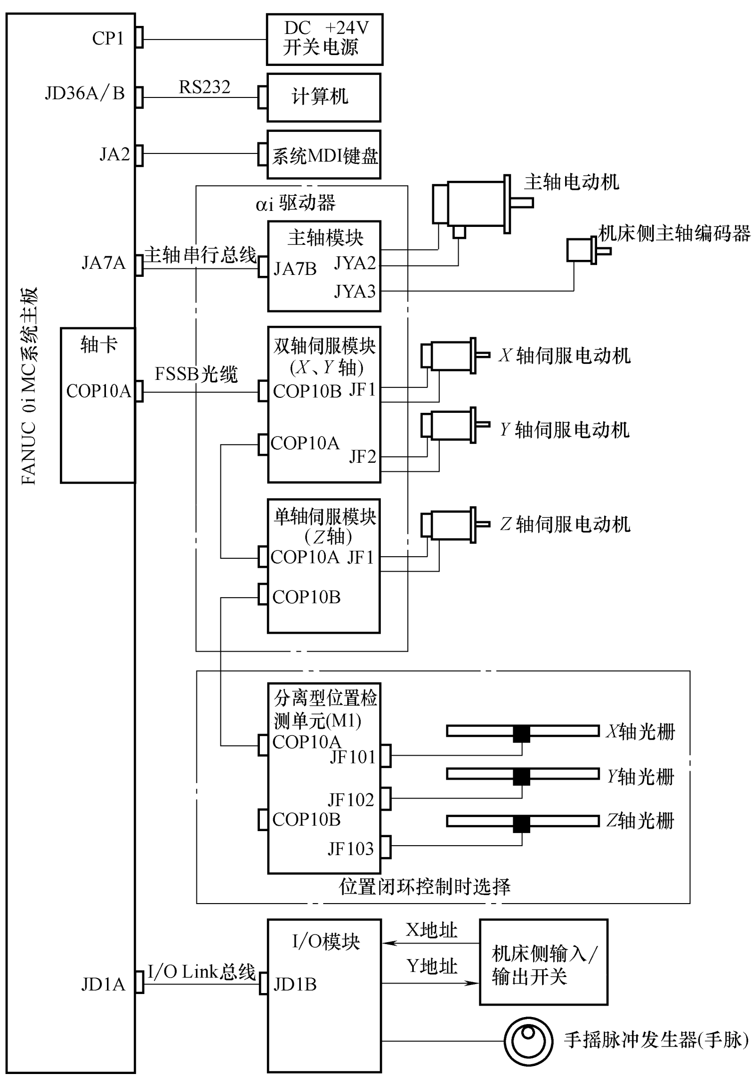


图 5-31　FANUC 0i-MC 系统连接

元和光栅。

2. FANUC 0iMate-MC 系统配置

图 5-32 为 FANUC 0iMate-MC 系统配置，图 5-33 所示为 FANUC 0iMate-MC 系统连接。

1）0iMate-MC 系统为 B 包功能，具备 3 轴控制功能和 3 轴联动，系统只有基本单元，无扩展功能。

2） 主轴及进给驱动为 βi SVSP 驱动器，βiS 系列主轴电动机和伺服电动机。

3）I/O 装置可选择外置 I/O 单元、分线盘 I/O 模块、操作盘 I/O 模块以及标准及操作面板模块等。

4） 机床操作面板可以选择标准机床操作面板模块，也可以选择机床厂开发的、针对机床控制特点的操作面板。

5）I/O Link 轴为选择配置，只能选择 1 根。

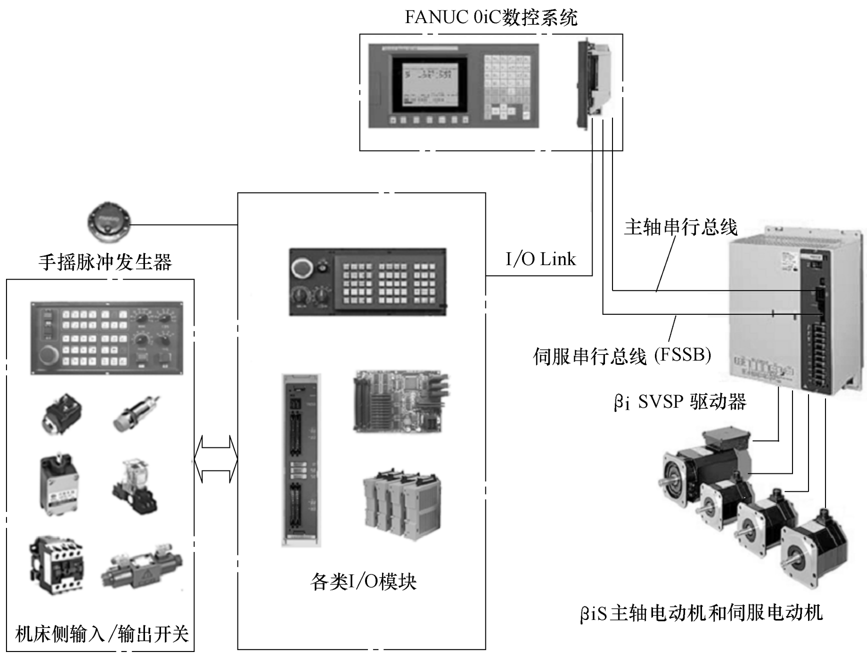


图 5-32　FANUC 0iMate-MC 系统配置

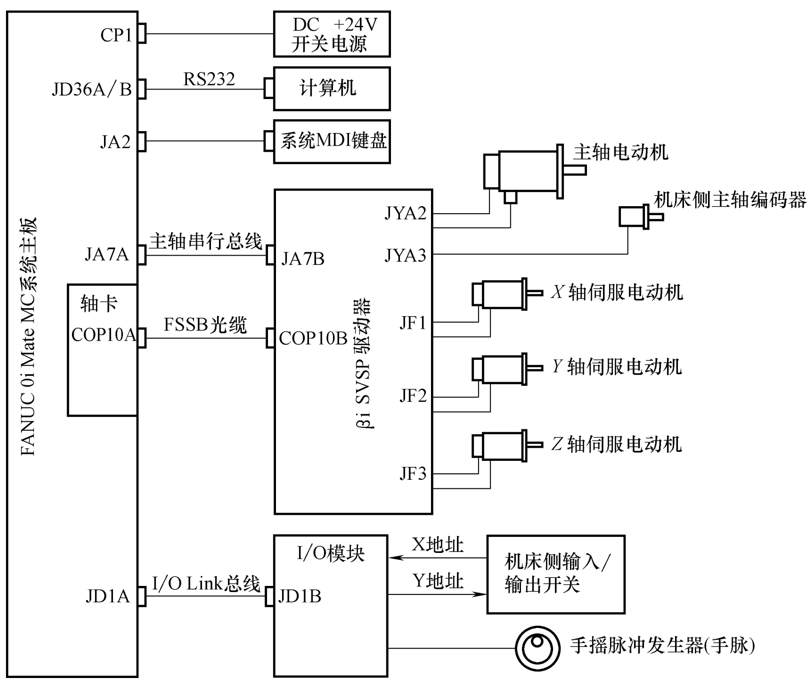


图 5-33　FANUC 0iMate-MC 系统连接

3. FANUC 0iMate-TC 系统配置

图 5-34 所示为 FANUC 0iMate-TC 系统配置，图 5-35 所示为 FANUC 0iMate-TC 系统连接。

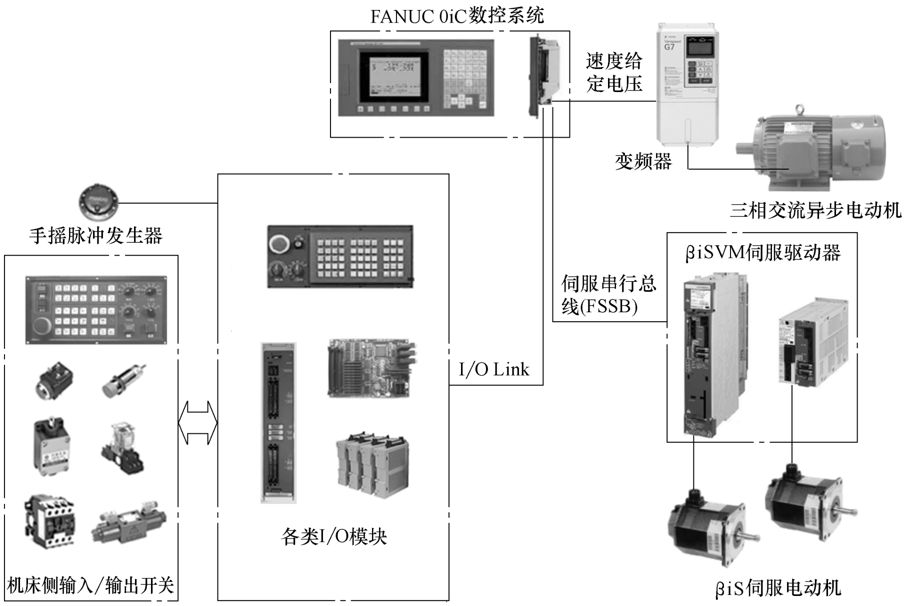


图 5-34 FANUC 0iMate-TC 系统配置

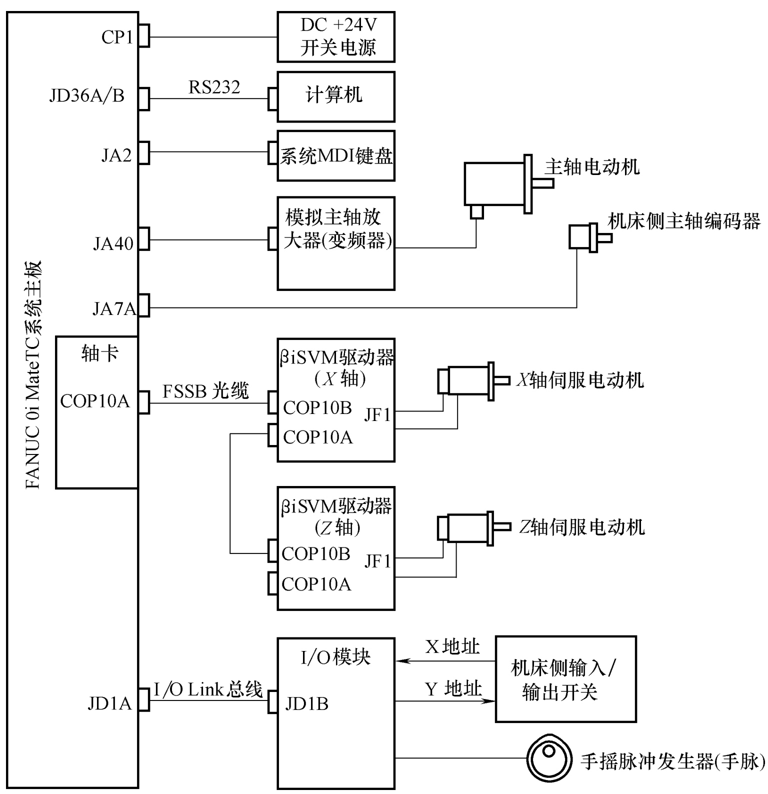


图 5-35 FANUC 0iMate-TC 系统连接

1）FANUC 0iMate-TC 系统适用于数控车床，为 B 功能包，具备 2 轴控制功能和 2 轴联动。系统只有基本单元，无扩展功能。

2）主轴驱动采用变频器及三相交流异步电动机的模拟主轴，进给驱动为 βi SVM 驱动器和 βiS 系列伺服电动机；选择配置为 βi SVSP 驱动器及 βiS 系列主轴电动机和伺服电动机。

3）I/O 装置可选择外置 I/O 单元、分线盘 I/O 模块、操作盘 I/O 模块以及标准机床操作面板等。

4）机床操作面板可以选择标准机床操作面板，也可以是机床厂开发的、针对机床控制特点的操作面板。

5）I/O Link 轴为选择配置，只能选择 1 个。

5.4.4　SINUMERIK 802Dsl 系统

1. 系统组成

SINUMERIK 802Dsl 属于西门子数控系统的中档产品，SINUMERIK 802Dsl 系统（后面简称 802Dsl 系统）结构紧凑，将 CNC、PLC、HMI 以及通信功能集成在一起，构成控制单元（PCU）。一方面，控制单元通过 DRIVE-CLiQ 驱动总线与 SINAMICS S120 驱动器连接，实现控制单元与驱动器、电动机及编码器之间的通信；另一方面，控制单元通过 PROFIBUS 总线与 I/O 模块（PP72/48）连接，实现控制单元与 PLC 之间的通信。图 5-36 所示为 802Dsl 系统组成。

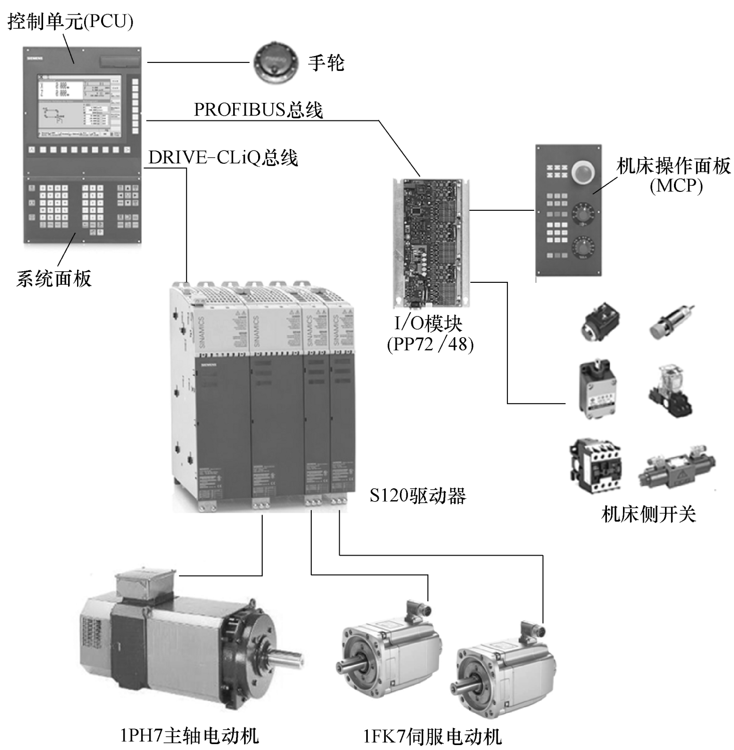


图 5-36　802Dsl 系统组成

2. PCU 接口及系统连接

802Dsl 系统 PCU 背面接口如图 5-37 所示。

X5：Ethernet 接口，通过网线连接到外部计算机。

X10：USB 接口，外部存储器接口。

X9：NC 键盘接口，用于连接系统面板。

X8：RS232 接口，连接外部计算机，与 PCU 进行数据交换。

X6：PROFIBUS 接口，连接 I/O 模块（PP72/48）。

X1/X2：DRIVE-CLiQ 接口，连接 SINAMICS S120 驱动器、编码器模块。DRIVE-CLiQ 是西门子公司制定的基于以太网技术的总线接口。

X30：电子手轮接口，最多连接 2 个电子手轮。

X20/X21：12 芯数字输入和输出端。

X110：硬件选件接口，连接 MCPA 模块，用于补充和扩展系统的功能。配备有模拟主轴 0~+10V 信号，连接外部机床控制面板的接口，以及快速数字输入和输出端口。

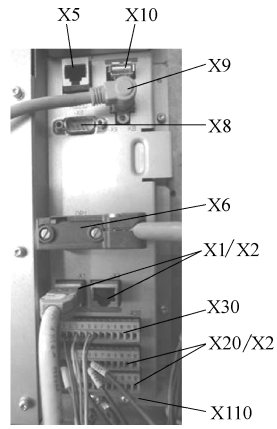


图 5-37　802Dsl 系统 PCU 背面接口

图 5-38 所示为 802Dsl 系统连接。

3. SINAMICS S120 书本型驱动器

SINAMICS S120 是西门子新一代的驱动器，是集 U/f 控制、矢量控制和伺服控制为一体

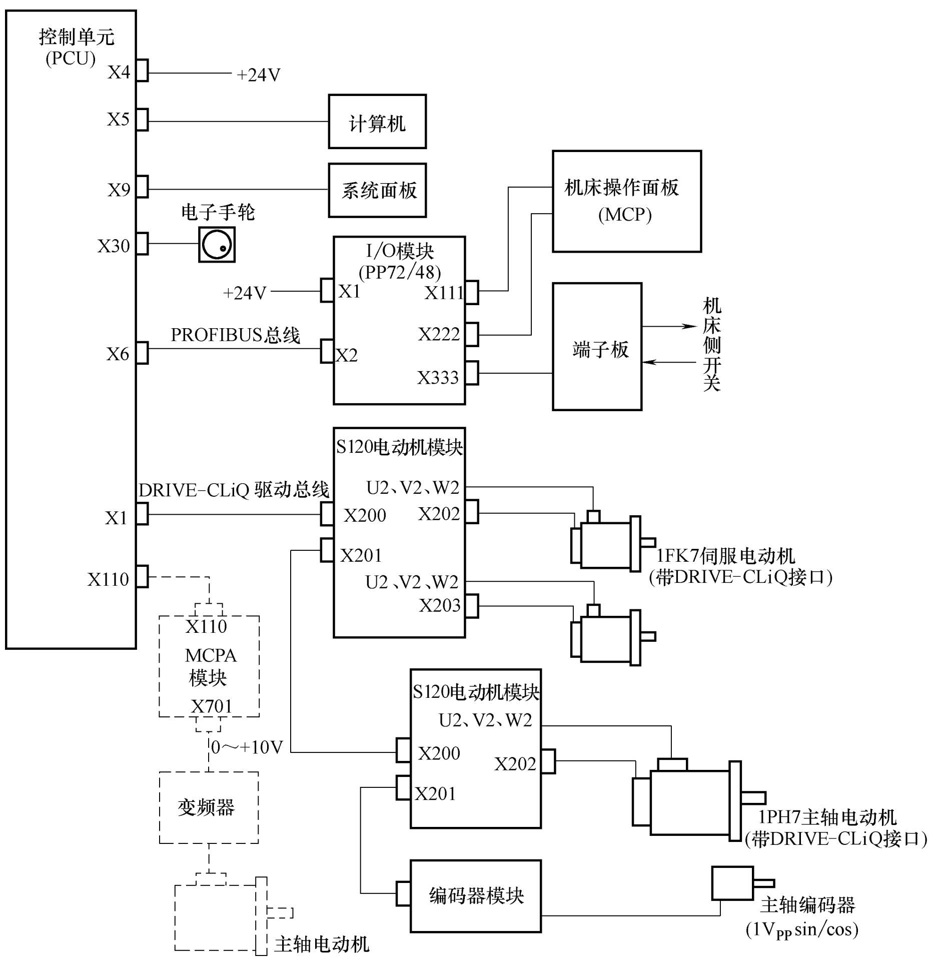


图 5-38　802Dsl 系统连接

的多轴驱动系统，可以驱动三相交流异步电动机、交流伺服电动机、力矩电动机或直线电动机。S120 书本型驱动器是一种直流共母线的变频器，由电源模块和电动机模块等组成，可用于数控机床的主轴和伺服驱动，如图 5-39 所示。

（1）电源模块　电源模块将 400V 三相交流电源整流成 600V 直流母线电压，并提供 +24V电源。电源模块有调节型和非调节型两种类型。

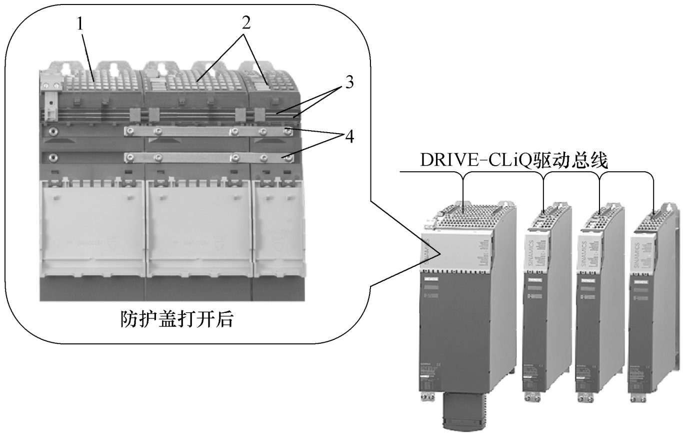
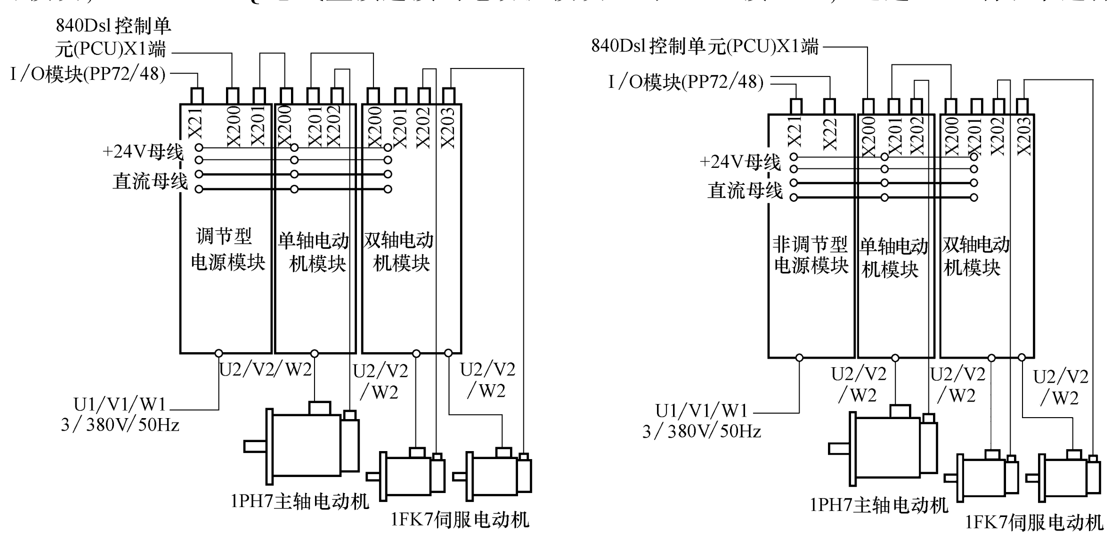


图 5-39　S120 书本型驱动器
1—电源模块　2—电动机模块　3—+24V 母线　4—直流母线排

1）调节型电源模块。调节型电源模块又称为带闭环控制的整流/回馈电源模块，其连接如图 6-40a 所示。调节型电源模块将三相交流电整流成直流电，能自动补偿电网的波动，通过调节电路使直流母线电压保持稳定，并采用回馈制动方式。调节型电源模块上有 X200 接口，通过 DRIVE-CLiQ 总线与 PCU 上的 X1 接口连接，DRIVE-CLiQ 总线再由电源模块上的 X201 接口连接到相邻的电动机模块 X200 上，按此规律连接所有电动机模块。调节型电源模块的功率等级有 36kW、55kW、80kW 和 132kW。

2）非调节型电源模块。非调节型电源模块又称为非调节式整流/回馈电源模块，其连接如图 6-40b 所示。非调节型电源模块将三相交流电整流成直流电，但直流母线不能调节。非调节型电源模块的功率等级有 5kW、10kW、16kW 和 36kW。对于 5kW、10kW 非调节型电源模块，DRIVE-CLiQ 总线直接连接到电动机模块上的 X200 接口上，通过 X22 端子来选择



a)　　b)

图 5-40　电源模块连接
a）调节型电源模块　b）非调节型电源模块（5kW、10kW）

是否采用回馈制动；对于 16kW 和 36kW 的非调节型电源模块，电源模块上有 X200 接口，通过 DRIVE-CLiQ 总线与 PCU 连接，可以通过参数来选择是否采用回馈制动，也可以接制动单元和制动电阻实现能耗制动。

（2）电动机模块　电动机模块有单轴和双轴模块两种类型，电动机模块将电源模块提供的 600V 直流母线电压逆变成三相交流电，作为主轴电动机和伺服电动机的电源；电动机模块通过 DRIVE-CLiQ 总线与控制单元进行通信，实现全数字式主轴和伺服驱动控制。与电动机模块配套的有 1PH7 系列主轴电动机、1FT 或 1FK 系列伺服电动机。其中，1FT6/7 系列伺服电动机适用于高动态和高精度的场合；1FK7 系列伺服电动机适用于经济型场合，有紧凑型、高动态型和高惯性型，以满足不同负载特性的需要。

4. 编码器模块

1PH7 系列主轴电动机和 1FK/1FT 系列伺服电动机可配置增量式或绝对式编码器，也可以是旋转变压器。当主轴电动机或伺服电动机集成有 DRIVE-CLiQ 接口时，编码器可直接连接到 S120 电动机模块上的 X202、X203 端口上，如图 5-38 和图 5-40 所示；若编码器采用普通针型插座接口，则需要根据编码器信号的性质通过 SMC20 或 SMC30 编码器模块转换成 DRIVE-CLiQ 总线信号再连接到 S120 电动机模块上的 X202、X203 端口上，如图 5-41 所示。

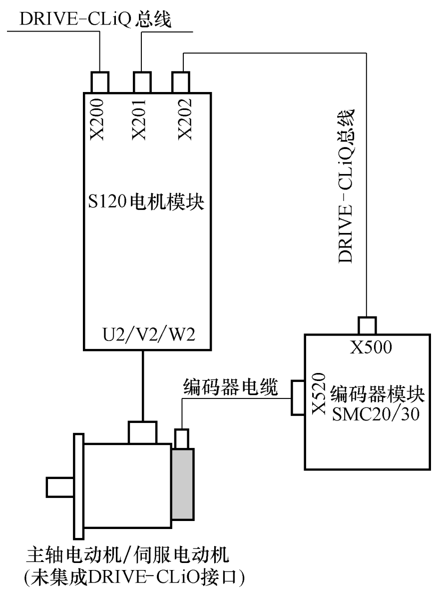


图 5-41　编码器模块

编码器模块有 SMC20 和 SMC30 两种型号，其中，SMC20 编码器模块的作用是将增量式编码器 $1V_{PP}\sin/\cos$ 信号或绝对式编码器 EnDat 数字信号转换成 DRIVE-CLiQ 总线信号；SMC30 用于将增量式编码器 TTL 信号转换成 DRIVE-CLiQ 总线信号。

5. 使能控制

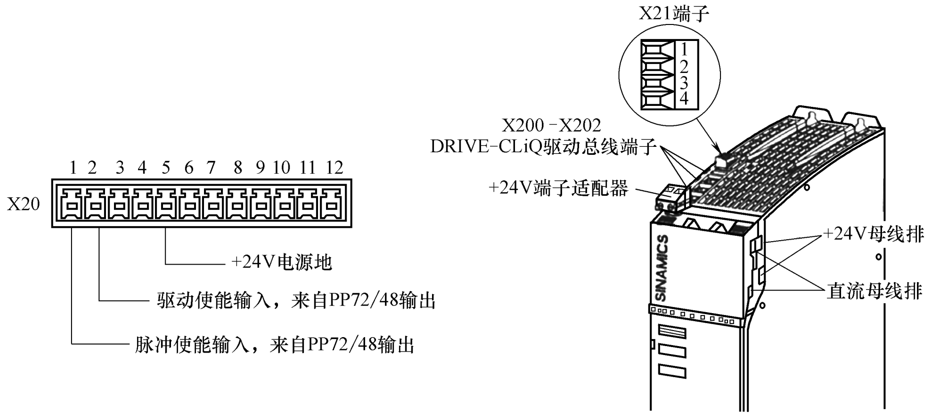
S120 驱动器的使能由 802Dsl 系统 PCU 上的 X20 端子、电源模块上的 X21 端子，以及 PP72/48 I/O 模块的输入和输出端子通过 PLC 控制完成，有关使能控制端子如图 5-42 所示；根据不同类型的电源模块，使能信号接线也有所不同，如图 5-43 所示。

PCU 上 X20. 1 端子为脉冲使能开关信号，其接通和断开由 PP72/48 I/O 模块的输出端子 Q×. ×（×. ×为用户定义的地址）控制，该端子上的使能断开时，所有进给轴和主轴电动机靠惯性自由停止，称为 OFF1 停止方式；PCU 上 X20. 2 端子为驱动使能开关信号，其接通和断开由 PP72/48 I/O 模块的输出端子 Q×. ×控制，该端子上的使能断开时，所有主轴和进给轴电动机减速停止，称为 OFF3 停止方式；电源模块上 X21. 3 端子为接触器使能开关信号，其接通和断开由 PP72/48 I/O 模块的输出端子 Q×. ×控制，该端子上的使能断开时，电源模块中的主接触器触点断开，电源模块主电源切断，所有电动机自由停止。

6. STARTER 软件

STARTER 软件用于 S120 驱动装置的现场配置和调试，能够实现在线监控、设定和修改驱动参数、故障检测、驱动复位以及跟踪记录等各种调试功能。STARTER 软件安装在外部

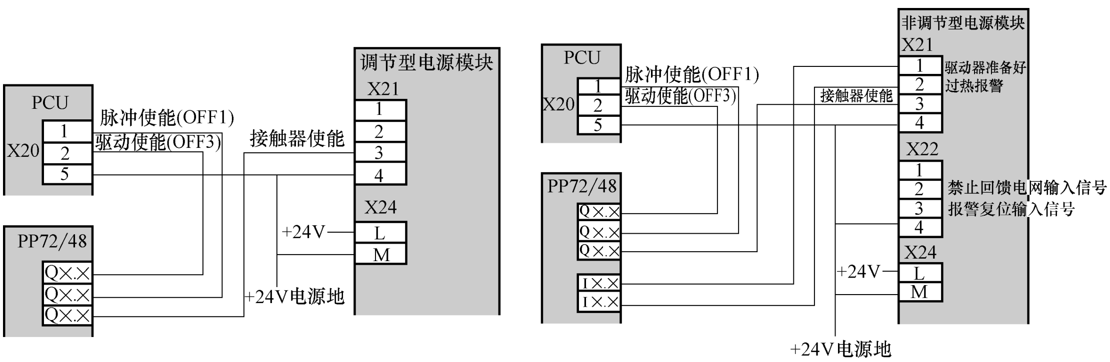
计算机上，计算机通过 RS232 或以太网与 802Dsl 系统连接。图 5-44 所示为操作 STARTER 软件过程中计算机显示的驱动配置画面。



a)　　　　b)

图 5-42　使能控制端子

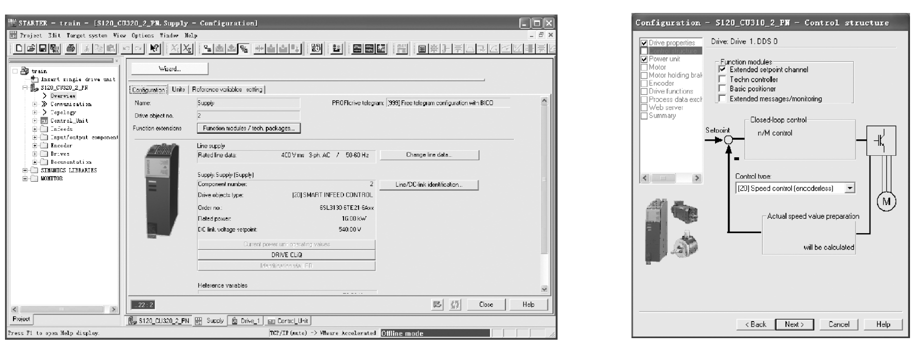
a）PCU 上的 X20 端子　b）调节型电源模块上的控制端子



a)　　　　b)

图 5-43　S120 驱动器使能控制接线

a）调节型电源模块　b）非调节型电源模块



a)　　　　b)

图 5-44　驱动配置画面

a）电源模块配置画面　b）编码器配置画面

思考题与习题

1. 填充题

（1）数控系统控制的对象是________、________和________。

（2）FANUC 0iC/D 系统的“三总线”是指________、________和________，它们分别与________、________及________装置连接。

（3）802Dsl 系统中，PCU 与 S120 驱动器之间通过________连接，与 I/O 模块之间通过________连接。

（4）插补运算的结果是得到________，插补运算的基本方法有________和________等；前者以________作为位置指令；后者以________作为位置指令。

（5）在多微处理器的数控系统中，各 CPU 分别用于________、________、________和________等方面的控制。

（6）数控系统中的 ROM 主要存储________、________、________和________等方面的软件，RAM 主要存储________、________和________等方面的软件。

（7）数控系统中的控制软件主要进行________、________、________、________和________等方面的处理。

（8）将 ROM 和 RAM 中的数据存储在外部存储器的过程称为________。

（9）数控系统组成的网络形式有________、________和________。

2. 简答题

（1）数控系统是怎样对加工程序中的 G、F、M、S 和 T 指令进行处理的？

（2）数控系统对刀具半径和长度进行补偿处理的目的是什么？

（3）说明编程轨迹和刀具中心轨迹之间的关系。

（4）数控系统对插补进行加减速处理的目的是什么？有哪些类型

（5）FANUC 0iC 数控系统中，串行主轴和模拟主轴是怎样实现的？

（6）SINUMERIK 802Dsl 数控系统中，S120 驱动器的电源模块和电动机模块各有什么作用？

3. 计算分析题

某数控机床采用模拟主轴，如图 5-45 所示。

已知主轴最高转速为 980r/min。当数控系统执行 S600 指令，且主轴倍率开关设定为 80%时，求：

1）主轴电动机的转速 n_M。

2）CNC 输出到变频器的速度给定电压 u_g。

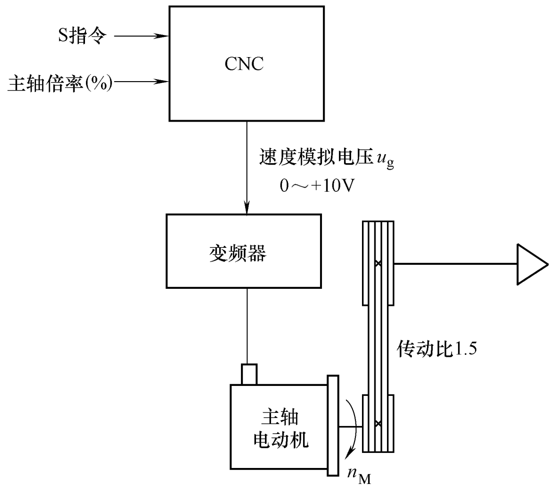
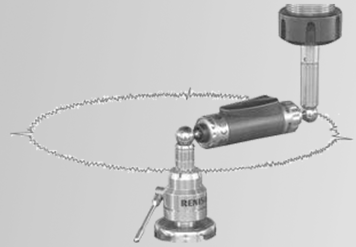


图 5-45　计算分析题图

第 6 章



数控机床伺服系统

数控机床伺服系统是以机床移动部件（如工作台、刀架等）的位置和速度为控制对象的自动控制系统。通常，伺服系统针对进给运动控制而言，称为伺服轴，伺服轴有直线轴（如工作台、刀架等）和回转轴（如数控转台等），伺服轴要完成定位和进给功能，涉及位置和速度控制。数控机床主轴一般只涉及速度控制，主要实现主轴调速和转矩输出，当主轴具有位置控制（如主轴定位、与其他轴联动插补）时，该主轴称为伺服主轴，又称为 C_s 轴。

6.1　伺服系统的类型及组成

为了使移动部件能快速、准确和稳定地到达加工程序指令所规定的位置，伺服系统根据有无位置检测与反馈以及位置反馈的形式，有开环、闭环和半闭环三种类型。

6.1.1　伺服系统的类型

1. 开环伺服系统

开环伺服系统适用于步进驱动的伺服系统中，无位置和速度检测，如图 6-1 所示。

数控系统将插补运算得到的位置指令脉冲输出到步进驱动器中，经信号处理和功率放大驱动步进电动机带动滚珠丝杠实现进给运动，脉冲数量决定了工作台的移动距离，脉冲频率决定了工作台的进给速度。因为无位置和速度检测，所以数控系统不能获知工作台实际移动的距离和速度，位置精度受步进电动机的步距角、丝杠精度，以及机械传动的间隙和刚度等因素的影响，位置精度较低，但开环伺服系统的稳定性较好。

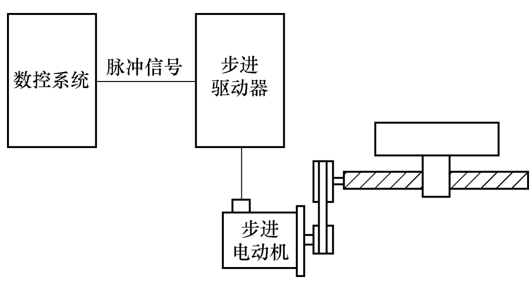


图 6-1　开环伺服系统

2. 闭环伺服系统

闭环伺服系统适用于伺服驱动的进给运动控制中，通过安装在移动部件上的光栅尺直接测量直线位移并反馈给数控系统，在数控系统中进行位置控制。图 6-2 所示为数字式闭环伺服系统。

在数字式闭环伺服系统中，数控系统通过伺服总线与伺服驱动器、光栅和编码器进行数据交换。其中，光栅进行位置检测，并将位置信息通过伺服总线反馈给数控系统，进行位置控制；伺服电动机上的编码器进行速度检测，并将速度信息反馈给伺服驱动器，进行速度控制。

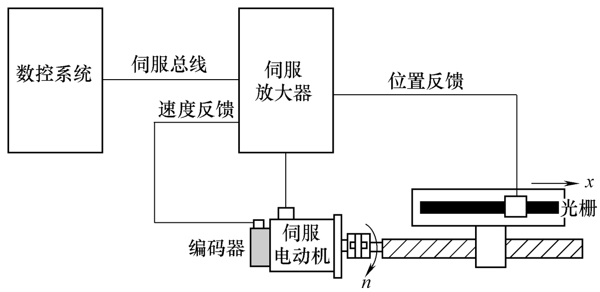


图 6-2　闭环伺服系统

在闭环伺服系统中，位置环包含有整个机械传动链，可以对传动链的误差进行全补偿，位置控制精度高，但伺服系统的稳定性较差。

3. 半闭环伺服系统

半闭环伺服系统适用于伺服驱动的进给运动控制中，通过伺服电动机上的编码器间接测量直线位移并反馈给数控系统，在数控系统中进行位置控制。图 6-3 所示为数字式半闭环伺服系统。

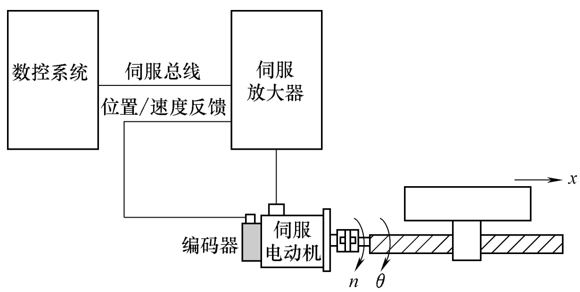


图 6-3　数字式半闭环伺服系统

在数字式半闭环伺服系统中，数控系统通过伺服总线与伺服驱动器、编码器进行数据交换。其中，编码器既进行角位移检测，又进行速度检测，角位移信息通过伺服总线反馈给数控系统，进行位置控制；速度信息反馈给伺服驱动器，进行速度控制。

在半闭环伺服系统中，位置环包含部分机械传动链，不能完全对传动链的误差进行补偿，位置控制精度相对闭环伺服系统要低些，但伺服系统的稳定性较好。

6.1.2　闭环和半闭环伺服系统的组成

将数控系统中的位置控制、伺服放大器中的速度和电流控制及功率放大、伺服电动机、机械传动机构，以及位置和速度检测等各环节组合起来，组成数控机床伺服系统。伺服系统传递函数框图如图 6-4 所示。

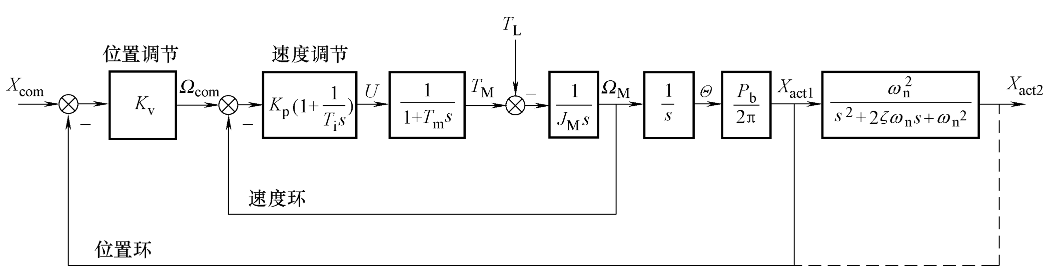


图 6-4　伺服系统传递函数框图

闭环和半闭环伺服系统是典型的“三环”控制系统，即位置环、速度环和电流环。通常，电流环包含在伺服驱动器内部，外部无连接线，而位置环和速度环在数控系统和伺服驱

动器外部就能表现出来，通过接口和电缆得以实现。

1. 位置环

位置环包括位置比较和位置调节。位置比较就是将插补得到的指令位置 X_{com} 与编码器或光栅检测到的实际位置 X_{act1} 或 X_{act2} 反馈进行比较，得到位置偏差，经位置比例调节器得到指令速度 Ω_{com}，位置调节采用比例调节器（P 调节），传递函数为位置增益 K_v。位置闭环中，位置反馈来自于光栅对工作台直线位移的直接检测，表示为 X_{act2}；位置半闭环中，位置反馈来自于编码器对工作台直线位移的间接检测，表示为 X_{act1}，其值与伺服电动机速度 Ω_M 及丝杠螺距 P_b 有关。对于位置闭环，一方面，位置反馈反映了工作台的实际位置，位置控制精度较位置半闭环高；另一方面，由于进给机械传动相当于二阶振荡环节，传递函数为 $\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$，其无阻尼固有频率 ω_n 和阻尼系数 ζ 与进给机械传动机构中的质量、弹性及阻尼有关，所以，机械传动的加入使得位置闭环的不稳定因素增多，相对于位置半闭环，位置闭环稳定性较差。位置调节中，位置增益影响到伺服系统的快速响应性和稳定性，位置增益增大，且位置指令变化时，实际位置能快速地响应指令位置的变化，伺服系统响应变快，但稳定性变差，表现为工作台运动时有振荡。

2. 速度环

速度环由速度比较和调节、伺服电动机及驱动等环节组成。速度比较就是将指令速度 Ω_{com} 与编码器检测到的伺服电动机实际速度 Ω_M 进行比较，得到速度偏差，经速度调节器得到电动机定子绕组电压 U，由此构成交流伺服电动机控制环节，实现对电动机的速度控制，电动机转速 Ω_M 经积分环节 $\frac{1}{s}$ 得到电动机转子角位移 Θ。速度调节器采用比例-积分调节（PI 调节），传递函数为 $K_p\left(1+\frac{1}{T_i s}\right)$，其中，$K_p$ 为速度增益，T_i 为速度积分时间常数。速度调节器的作用是，当负载发生变化时，通过速度调节保证伺服电动机转速稳定，从而保证伺服系统运行的稳定性，并减小系统的稳态误差，提高位置控制精度。

6.2 伺服系统的性能及补偿

6.2.1 跟随误差

在位置控制过程中，指令位置随时间恒速变化时，由于伺服系统位置负反馈的特性，实际位置总是滞后于指令位置，两者之间的偏差称为跟随误差，如图 6-5 所示。

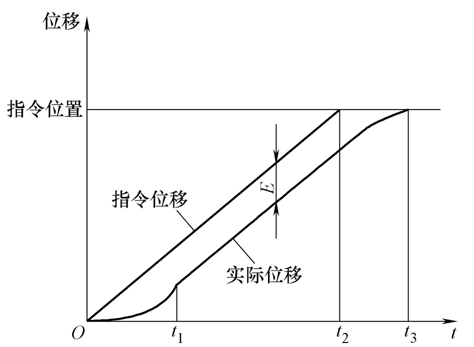


图 6-5 跟随误差

跟随误差的表达式为

$$E=\frac{v}{K_v}$$

式中 E——跟随误差；

v——进给速度；

K_v——位置增益。

在 $0 \sim t_1$ 时段，轴为加速阶段；t_1 时刻后，轴进入恒速阶段，在 t_2 时刻，指令位置已到达目标位置，但由于跟随误差的存在，实际位置尚未到达目标位置；$t_2 \sim t_3$ 为延时时段，轴逐渐减小跟随误差，在 t_3 时刻，实际位置才到达目标位置。在进给速度 v 不变的情况下，位置增益 K_v 越大，跟随误差 E 越小，伺服轴响应越快，但 K_v 过大时，伺服轴易振荡，稳定性变差。

6.2.2　轮廓误差

由于单轴跟随误差的存在，当多个伺服轴联动时，各单轴跟随误差必然要反映到零件轮廓上，造成轮廓误差。

1. 位置增益对轮廓误差的影响

（1）两轴联动直线轮廓误差　在 X-Y 平面内进行直线插补加工时，由于 X 轴和 Y 轴跟随误差 E_x 和 E_y 的存在，存在直线轮廓误差，如图 6-6 所示。

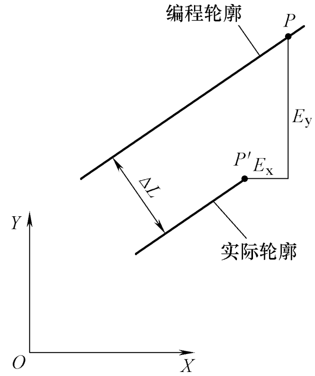


图 6-6　直线轮廓误差

当指令位置在编程轮廓 P 点时，实际位置则在 P'点，由此造成轮廓误差 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{v \sin 2\alpha}{2} \frac{K_{vy} - K_{vx}}{K_{vx} K_{vy}}$$

式中　α——直线轮廓与 X 轴的夹角；

K_{vx}、K_{vy}——X 轴、Y 轴跟随误差。

轮廓误差 Δ 正比于 Y 轴增益 K_{vy} 与 X 轴增益 K_{vx} 之差，当 K_{vy} 与 K_{vx} 相等时，轮廓误差 ΔL 为零。

（2）圆弧轮廓误差　在 X-Y 平面内进行圆弧插补加工时，由于 X 轴和 Y 轴跟随误差的存在，存在圆弧轮廓误差，如图 6-7 所示。

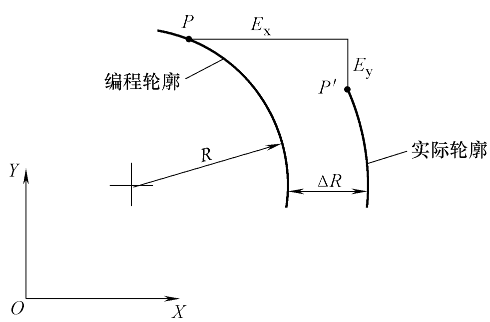


图 6-7　圆弧轮廓误差

当指令位置在编程轮廓 P 点时，实际位置则在 P'点，圆弧轮廓误差 ΔR 为

$$\Delta R = \frac{K_{vy}^2 v^2 + (K_{vx}^2 - K_{vy}^2) v_y^2}{2R K_{vx}^2 K_{vy}^2}$$

式中　v_y——进给速度 v 在 Y 轴的分量；

R——圆弧半径。

当 $K_{vy} = K_{vx} = K_v$ 时，ΔR 为

$$\Delta R = \frac{v^2}{2R K_v^2}$$

圆弧轮廓误差 ΔR 始终存在，圆弧半径越大，圆弧轮廓误差越小；降低进给速度、增大位置增益可减小圆弧轮廓误差。另外，当 K_{vy} 和 K_{vx} 不相等时，除了圆弧轮廓误差，圆弧轮廓还会出现圆度误差，即圆弧轮廓呈长轴 45°或 135°方向的斜椭圆。

由此，在两轴联动控制中，不管是直线插补还是圆弧插补，为了减小轮廓误差，必须将联动轴的位置增益调整至相等。

2. 拐角误差

拐角误差是轮廓误差另一种表现形式。当插补从一个轮廓转到另一轮廓时，由于跟随误差的存在，轮廓拐角处会产生误差。图 6-8 所示为 *X-Y* 两轴联动铣削拐角的示意图。

刀具沿 *X* 轴正方向切削进给，当指令位置到达 *B* 点时，由于 *X* 轴有跟随误差，刀具实际位置滞后一段距离。此时，在 *X* 轴的 *A* 处，指令已开始 *Y* 轴运动，一方面，刀具沿 *X* 轴在消除跟随误差的过程中继续运动到 *B* 点；另一方面，刀具还进行 *Y* 轴运动，结果是 *X* 轴和 *Y* 轴两运动在拐角处合成构成了一个弯曲过渡，造成轮廓误差，最大值为 Δ_1，表现为零件过切；拐角过渡后，在位置增益较高的情况下，*Y* 轴还会产生超调，最大值为 Δ_2，表现为零件欠切。

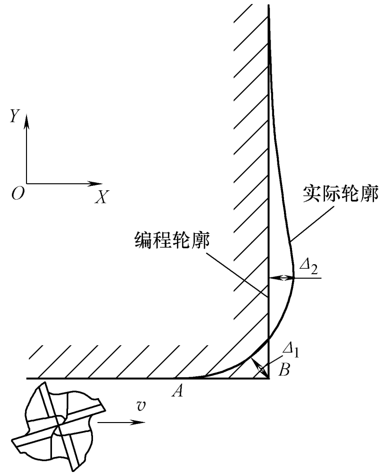


图 6-8　*X-Y* 两轴联动铣削拐角的示意图

6.2.3　伺服性能评价

1. 零件试切削

零件试切削是一种传统的伺服性能评价方法。通过对试件切削精度的检测，做出对机床精度及伺服系统的评价，也为机床精度和伺服调整提供依据。以数控铣床为例，试切削图 6-9 所示的零件，通过三坐标测量机测量的结果，获得对机床伺服性能的评价，并进行相应的伺服调整。

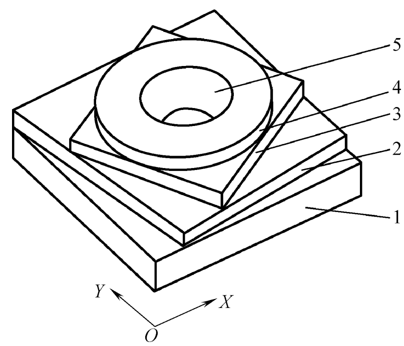


图 6-9　数控铣床试切削零件

1—*X*、*Y* 单轴直线插补
2—*X*、*Y* 两轴联动插补
3—斜四边形轮廓　4—圆周外轮廓
5—圆周内轮廓

（1）直线铣削精度　使 *X* 轴和 *Y* 轴分别单独进给，铣削试件正四边形周边，检验正四边形各边的直线度、对边的平行度及邻边的垂直度，该项目主要检验 *X* 轴和 *Y* 轴导轨运动的几何精度。

（2）斜线铣削精度　*X* 轴和 *Y* 轴联动进给，铣削斜四边形周边，该项目主要检验机床 *X* 和 *Y* 轴直线联动时的运动品质。当两轴伺服特性不一致时，会使直线度、对边平行度及邻边的垂直度等超差。有时虽然几何精度不超差，但在加工表面上出现有规律的条纹，这种条纹在两直角边上呈现一边密一边疏的状态，这是由于两轴联动时，其中某一轴进给速度不均匀造成的。

（3）圆轮廓精度　最能体现伺服性能的是圆轮廓铣削，圆轮廓铣削后可能出现的圆度误差如图 6-10 所示。

图 6-10a 中，两半圆错开（上下半圆错开，或左右半圆错开）是由于机械传动反向间隙造成的；图 6-10b 中，在过象限处，由于联动轴中某一轴瞬间反向引起摩擦力急剧增加，伺服系统来不及响应这一变化而造成速度瞬间变化，从而在圆弧过象限处产生突起；图 6-10c中，出现斜椭圆，主要是由于两轴位置增益不一致造成的，尽管在系统中两轴增益参

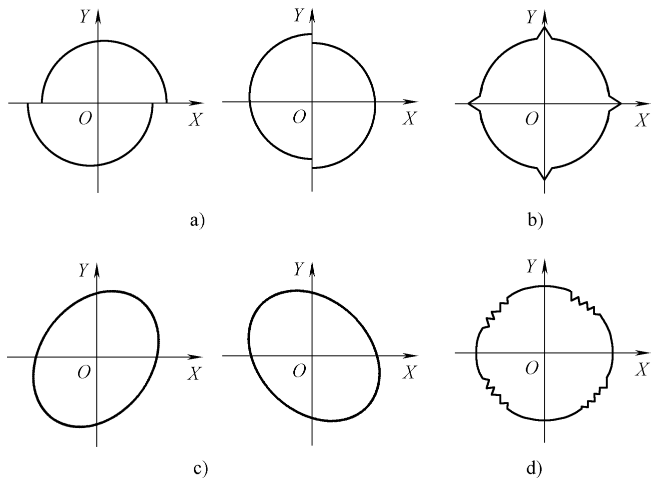


图 6-10 圆度误差

a）两半圆错开 b）过象限突起 c）斜椭圆 d）锯齿形条纹

数设置成一样，但由于机械结构、负载情况不同，也会造成实际系统增益的差异；图 6-10d 中，圆周上出现锯齿形条纹，是由于两轴联动时，其中有一轴进给速度不均匀造成的。很多情况下，圆度误差是综合性的，既有过象限突起、两半圆错开、斜椭圆，又有锯齿形条纹。

2. 球杆仪测量

球杆仪是一种高精度的位移传感器，测量精度可达到 0.1μm，可以取代传统的试件切削检测，不仅能快速检测机床精度，还能通过测量获得的数据对伺服系统性能做出评价。图 6-11 所示为球杆仪测量示意图。

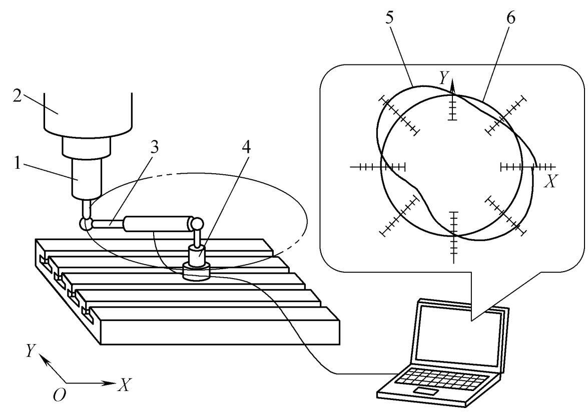


图 6-11 球杆仪测量示意图

1—连接杆 2—主轴 3—球杆仪伸缩杆

4—磁性支座 5—测试圆轨迹 6—理想圆轨迹

球杆仪伸缩杆一端通过球关节与连接杆连接，连接杆安装在主轴中，另一端通过球关节与磁性支座连接，磁性支座通过磁性吸合在工作台上。通过运行整圆测试程序，使主轴相对于工作台做圆周运动，由于 X、Y 两轴联动存在误差，圆周运动过程中伸缩杆有微小的位移变化，球杆仪将位移变化转换成电信号，通过数据线或无线发射传输给计算机，计算机通过测量软件获得实际圆弧轨迹，从而对机床伺服性能做出评价，并为伺服调整提供依据。

6.2.4 伺服补偿

伺服系统在位置环、速度环和电流环组成的基础上，通过设置补偿环节，进一步提高位置控制精度，提高伺服系统的稳定性和快速响应性。图 6-12 中的虚线部分为伺服系统的补偿环节。

伺服补偿就是在指令位置、指令速度的基础上，人为地加入补偿值进行干预。补偿值事

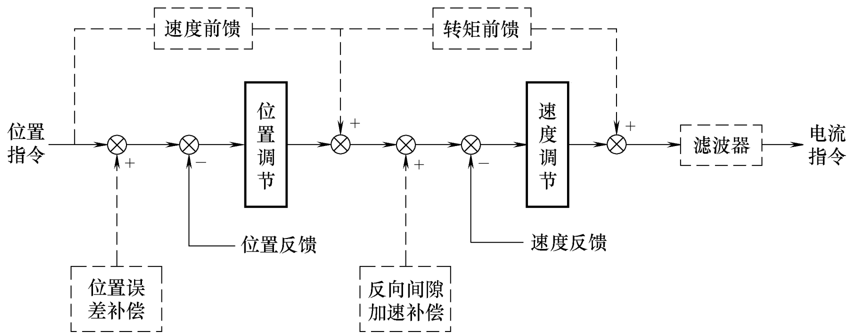


图 6-12　伺服补偿

先通过各种测量手段获得。

1. 位置误差补偿

位置误差补偿设置在位置环中，主要包括反向间隙补偿和丝杠螺距累积误差补偿，有些数控系统还有垂度补偿和温度补偿等。位置误差补偿有利于提高轴的位置精度。

2. 摩擦补偿

由于机械动、静摩擦以及黏滞摩擦等因素的影响，轴在反向瞬间速度有突变，表现为加工圆弧轮廓时在过象限处工件表面有突起。在速度环中设置摩擦补偿（又称反向间隙加速补偿）能改善轴瞬间反向时速度的变化，使速度保持稳定，提高轮廓表面精度。

3. 滤波器

当轴运行时有共振频率时，可通过设置滤波器对振荡频率进行抑制，以保证伺服系统的稳定性。

4. 前馈补偿

在高速、高精度伺服系统中，前馈补偿可以减小位置误差和轮廓误差。其中，速度前馈的作用是将 CNC 发出的位置指令转换成速度指令补偿，该补偿减小了由位置环延迟产生的位置误差和轮廓误差；转矩前馈的作用是将速度指令转换成转矩指令补偿，该补偿减小了由速度环延迟产生的位置误差和轮廓误差。

6.3　伺服系统的调整及优化

6.3.1　伺服优化的目的

伺服优化就是通过对系统伺服参数和机械传动的调整，使伺服系统的机电匹配达到最佳，以获得最优的稳态性能和动态性能。机电不匹配通常会引起伺服轴振荡、零件轮廓拐角加工时欠切或过切，以及表面粗糙度值大等问题。在高速、高精度数控机床中，伺服优化显得尤其重要。伺服系统由位置环、速度环和电流环组成，伺服系统调整的原则是，电流环的响应要最快，速度环的响应必须高于位置环，如果不遵守此原则，将造成伺服系统振荡。因为电流环内置在伺服放大器中，且已设计成良好的响应特性，所以，电流环一般不需要调整，用户只需要调整位置环和速度环的伺服参数。调整顺序为先调整速度环参数，使速度环稳定，再调整位置环参数，使位置环稳定。

目前，数控系统都有配套的伺服调整软件，如 FANUC 系统的 SERVO GUIDE 软件、SINUMERIK 802D 数控系统的 SimoCom U 软件、SINUMERIK 802Dsl 数控系统的 Start Up TooL 软件等。将伺服调整软件安装在计算机中，计算机与数控系统连接并进行相关的通信设置；数控系统运行测试程序，将采集到的位置、速度和电流等数据传输到计算机中，计算机通过伺服调整软件，显示圆度和拐角测试图形、频率分析波形等，技术人员通过对图形和波形的分析，对当前的伺服性能做出评价，并进行相应的调整，使伺服性能达到最优。以 FANUC 系统的 SERVO GUIDE 软件为例，其配置和连接如图 6-13 所示。

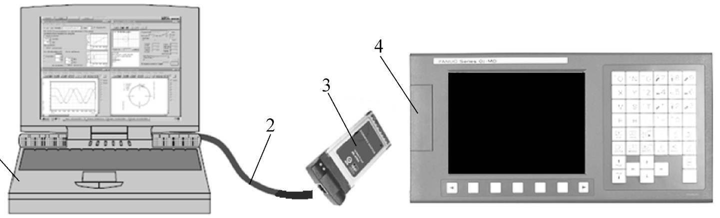


图 6-13　FANUC 系统的 SERVO GUIDE 软件的配置和连接

1—安装有 SERVO GUIDE 软件的计算机　2—网线　3—以太网卡　4—系统 PCMCIA 槽

以太网卡插入系统 PCMCIA 槽中，通过网线与计算机连接，并在数控系统侧和计算机侧设定 IP 地址；计算机中安装有 SERVO GUIDE 软件，通过网线连接对机床伺服轴和主轴进行调试。

6.3.2　伺服调整和优化的内容

1. 阶跃响应分析

阶跃响应分析适用于对速度环的性能评价。对速度环，阶跃响应就是给速度环输入一个速度给定，观察速度环能否快速响应这个给定，如图 6-14a 所示。

图中，t_r 为上升时间，定义为响应曲线从原工作状态出发，第一次达到输出稳态值所需的时间；t_p 为峰值时间，定义为响应曲线达到第一个峰值所需的时间；M_p 为最大超调量，

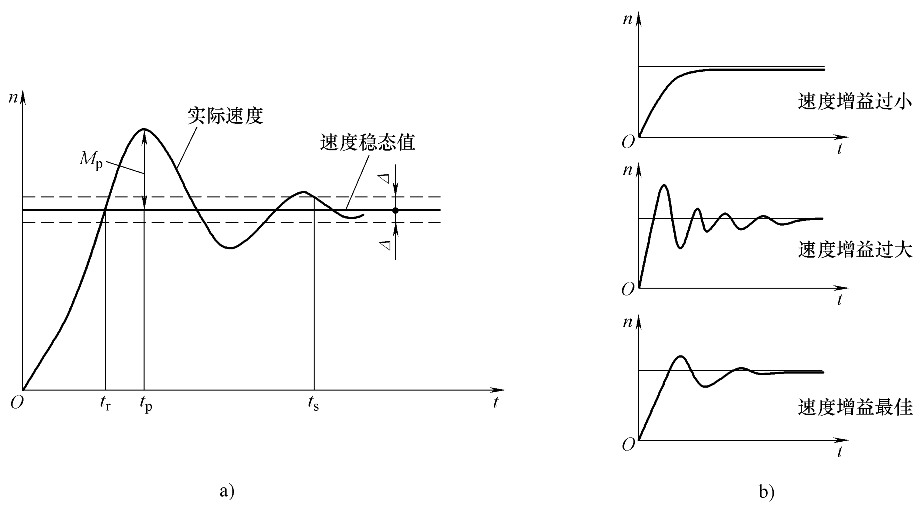


图 6-14　速度环阶跃响应

a）性能指标　b）速度增益对性能的影响

定义为响应曲线在峰值时间达到的最大值，其数值表示为

$$M_p = \frac{\text{响应曲线最大值} - \text{稳态值}}{\text{稳态值}} \times 100\%$$

t_s 为调整时间，定义为响应曲线经振荡调整后进入允许误差带 Δ 所需的时间。上升时间越短，系统的响应速度越快，但超调量越大，调整时间越长，严重时会引起系统振荡。伺服系统速度环通常允许有 20%的超调，且超调后能马上趋于稳定。上升时间和超调量与速度环的速度增益和速度积分时间等参数有关，速度增益越大、速度积分时间越短，速度响应越快，但易振荡，如图 6-14b 所示。

2. 频率特性分析

频率特性分析是研究伺服系统性能的有效手段。就一个具体的系统而言，输入某一频率的正弦信号，输出响应仍是同频率的正弦信号，但输出与输入的幅值和相位不同，如图 6-15 所示。

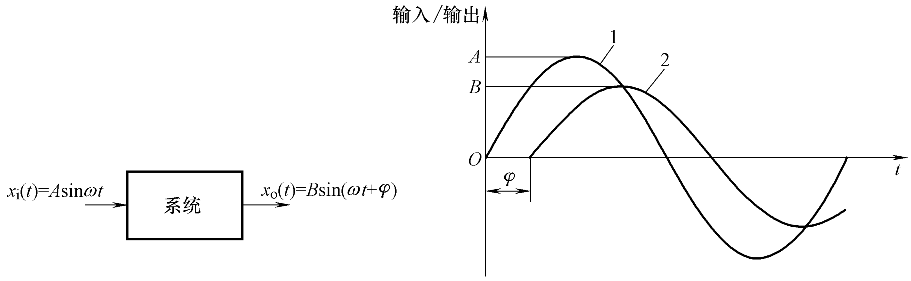


图 6-15　系统正弦输入和输出信号

a）系统正弦输入和输出信号　b）输入和输出波形

1—输入信号　2—输出信号

输入信号 $x_i(t)$ 为正弦信号，频率为 ω（$\omega=2\pi f$），幅值为 A；输出信号 $x_o(t)$ 也为正弦信号，频率仍为 ω，幅值为 B，相位为 φ。其中：

$$\text{幅值比} = 20\lg \frac{\text{输出幅值}}{\text{输入幅值}}$$

单位为 dB。

例如：输入正弦波信号，频率为 10Hz，幅值 $A=1$，经控制系统后，输出信号也为正弦波，频率仍为 10Hz，幅值 $B=0.7$，相位 $\varphi=-45°$。则：幅值比 $=20\lg(0.7/1)\text{dB}=-3.1\text{dB}$，相位差为−45°。

如果输入不同频率的正弦波信号，就会得到相应的正弦波输出信号，其幅值比和相位差随频率变化，这一特性称为系统的频率特性。将幅值比和相位差随频率变化的规律放在一张图中描述，即为伯德（Bode）图，如图 6-16 所示。

其中，幅值比随频率变化的为幅频特性，相位差随频率变化的为相频特性。伯德图是频率特性分析常用的工具，在数控机床伺服优化中通常用于速度环的频率特性分析。

对机床一个伺服轴而言，总是希望输出与输入比值为 1，即实际值等于设定值，如速度环的实际速度和指令速度，且相位差为 0，即没有超前或滞后。通常在调试时，希望伯德图中的幅频曲线在 0dB（20lg 实际值/指令值 = 20lg1dB = 0dB）处保持尽可能宽的范围。谐振频率 f_r 是幅频特性超过 0dB 且达到 3dB 时的频率，在一定程度上反映了系统的瞬态响应速

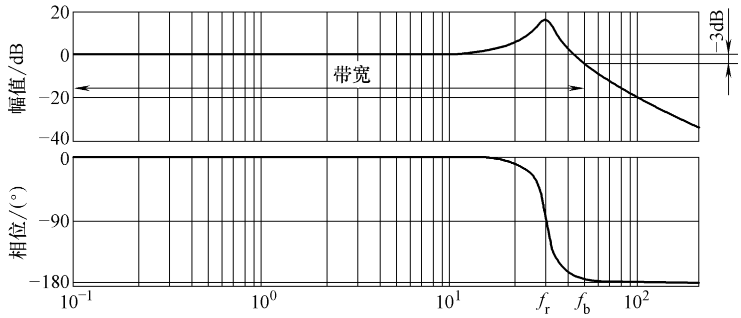


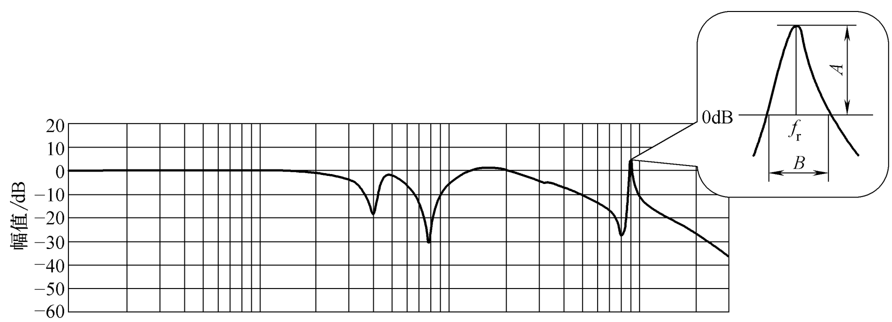
图 6-16　伯德图

度，谐振频率处的相频特性会产生-180°～0 的突变，谐振频率易引起系统振荡。频率特性分析可测量出机床各伺服轴的谐振频率，通过设置滤波器参数来抑制谐振；截止频率 f_b 是幅频特性由 0dB 下降到-3dB 时的频率，频率 0～f_b 的范围称为截止带宽频率或带宽，带宽越大，系统响应的快速性越好。

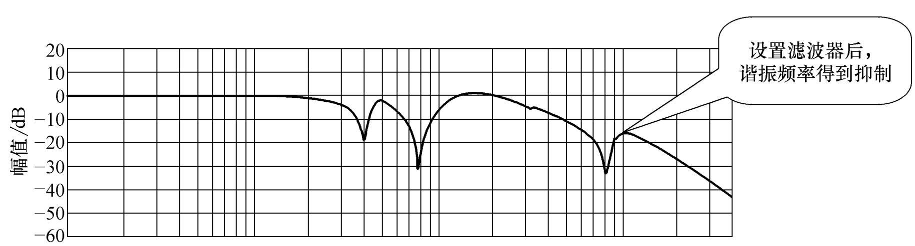
在速度环中，增加速度环增益可使带宽变大，但也容易引起振荡。例如：优化某机床 X 轴速度环，执行测试程序：

```
G91 G94;
G01 X10 F1200;
G04 X0.1;
G01 X-10 F1200;
M99;
```

机床 X 轴运行，计算机通过 SERVO GUIDE 软件显示幅频特性曲线，如图 6-17a 所示。



a)



b)

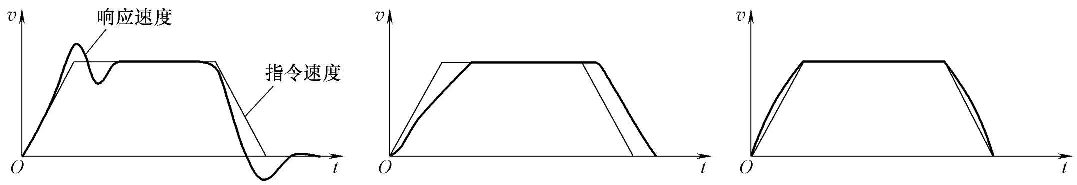
图 6-17　速度环幅频特性

a）调整前　b）调整后

伺服系统速度环幅频特性曲线表示伺服电动机的实际速度与指令速度的比值。图 7-17a 中，幅频特性曲线在频率 f_r 处附近超过 3dB，轴在该频率处会产生振荡，表现为伺服电动机产生啸叫。f_r 称为谐振中心频率，超过 0dB 的频率范围称为谐振频率宽度，见图 6-17a 中 B，超过 0dB 的幅度称为谐振峰值，见图 6-17a 中 A。通过滤波器设定参数（中心频率、频率宽度及峰值）可衰减谐振频率，以消除振荡，并在此基础上可继续提高速度环增益，以提高速度环快速响应性。图 6-17b 所示为调整后的幅频特性曲线。

3. 伺服跟踪

现代数控系统内置有诊断监视软件，可以对伺服轴的位置、速度及电流等进行检测，经软件分析，在系统显示器上显示位置指令及位置偏差、指令速度及实际速度、电流指令及实际电流等数据的波形曲线，从而对轴当前的伺服性能进行评价并做相应的调整，此时，系统显示器相当于示波器功能。图 6-18 所示为 FANUC 0iC/D 系统对机床某轴进行速度跟踪的波形，从而对位置环进行优化。



a)　　b)　　c)

图 6-18　速度跟踪波形

a）位置增益过大　b）位置增益过小　c）位置增益最佳

4. 圆度测试

空载时，机床按编制的程序运行一个圆轨迹，数控系统通过采集联动轴的位置、速度等信息，经伺服调整软件的处理，在计算机上显示圆轨迹。圆度测试用来评价联动轴的插补功能和圆弧轮廓误差，通过伺服参数调整，获得最佳的轮廓曲线。以 SERVO GUIDE 软件为例，圆测试程序如下：

G00 X0 Y0；

G02 I50 J0 F2000；

M99；

机床运行，计算机上显示圆轨迹，如图 6-19a 所示。

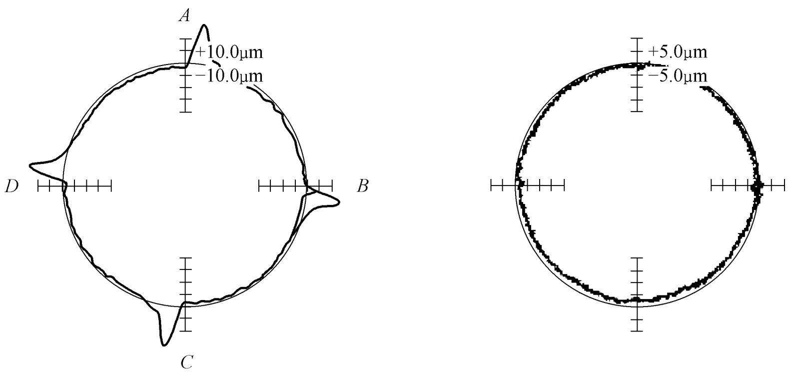
图 6-19a 中，A、B、C 和 D 过象限处有突起，造成这一现象的主要原因是轴的摩擦特性。以第Ⅰ象限过第Ⅱ象限为例，逆时针方向走圆时，在过象限 A 处，Y 轴由正向瞬时变为负向，由于 Y 轴摩擦特性的原因，Y 轴伺服电动机速度瞬时降低，速度环来不及调整，最终在 A 处产生轮廓误差，B、C 和 D 处存在同样的问题。为克服这一现象，可设置反向间隙加速补偿功能，设置的参数有：

PRM2003#5 为“1”：反向间隙加速功能有效。

PRM2048：反向间隙加速补偿量。

PRM2071：反向间隙加速时间。

通过对 PRM2048 和 PRM2071 参数的不断调整和圆度测试，以获得理想的圆轨迹。图 6-19b所示为反向间隙加速补偿设定后的圆度测试图形。



a)　　　　b)

图 6-19　圆度测试

a）反向间隙加速补偿设定前　b）反向间隙加速补偿设定后

思考题与习题

1. 填充题

（1）数控机床伺服系统由________、________、________、________和__________等组成。

（2）伺服系统的控制目标是____________和____________；控制要求是__________、__________和____________。

（3）半闭环伺服系统中，伺服电动机中的编码器用于__________和__________检测；闭环伺服系统中，编码器用于__________检测，光栅用于__________检测。

（4）伺服系统位置环的主要参数是____________，速度环的主要参数是__________和________________。

（5）反向间隙补偿和丝杠螺距累积误差补偿可提高________________，反向间隙加速补偿（摩擦补偿）可保证轴反向时________________，前馈补偿可减小______________，提高轮廓加工精度。

（6）伺服调整和优化的目的是____________________________________，优化顺序是：先__________环，后____________环。

2. 简答题

（1）数控机床伺服系统位置控制的本质是什么？

（2）位置跟随误差是怎样产生的？与哪些参数有关（写出表达式）？

（3）位置增益的大小对伺服系统有什么影响？

（4）为什么要将两轴联动伺服轴的位置增益设定成相同？

（5）伺服补偿有哪些方面？

（6）伺服优化有哪些方法？

3. 分析题

（1）为检验某数控铣床 X、Y 两轴联动的伺服特性，通过圆度测试得到圆轨迹图形如

图6-20 所示。

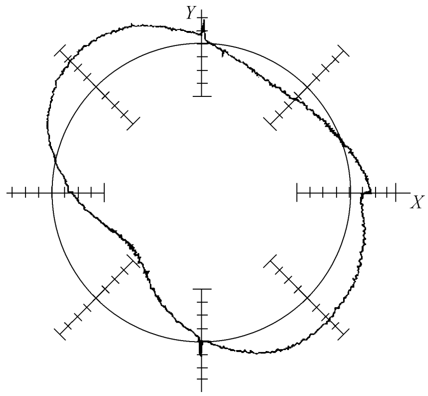


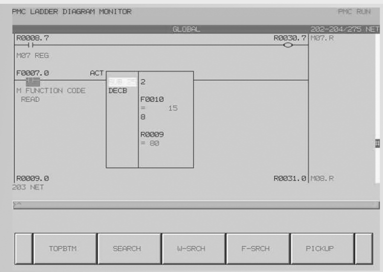
图 6-20　分析题（1）图

请分析：

1）造成椭圆轨迹的原因是什么？如何调整？

2）过象限处有突起现象，原因是什么？如何调整？

（2）某数控铣床 X 轴在运行过程中出现振荡现象并伴有“嗡、嗡”声。维修工程师根据“先机后电”的诊断原则，现场对 X 轴丝杠轴承圆螺母进行了预紧，重新运行 X 轴，故障现象消失。维修工程师这一做法的目的和机理是什么？



第 7 章

数控机床PLC控制

7.1　概述

7.1.1　数控机床 PLC 控制任务

现代数控系统均内置有可编程序控制器（PLC）功能，与常规 PLC 控制的不同之处在于，数控机床 PLC 有对外和对内两重控制任务，如图 7-1 所示。

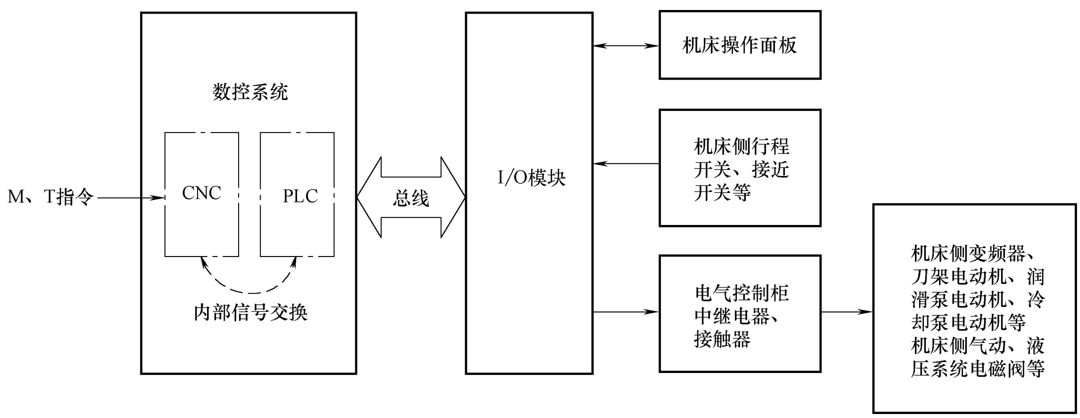


图 7-1　数控机床 PLC 控制任务

1. 数控机床 PLC 对外控制

数控机床在手动或自动操作方式下，通过机床操作面板上的按键，或执行 M、T 指令，经数控系统中的 PLC 控制对外输出开关信号，使机床侧的辅助功能运行，如切削液开关、刀库选刀、机械手换刀等；同时，机床侧各类检测开关将机床当前的状态输入到 PLC 中，由 PLC 进行逻辑运算。

2. 数控机床 PLC 对内控制

数控机床 PLC 每个动作的执行与完成都要与 CNC 进行数据交换，数据交换的信号称为接口信号，每个接口信号都有数控系统规定的功能。CNC 根据这些接口信号可以对主轴和伺服轴等进行控制。

7.1.2 数控机床 PLC 程序组成

数控机床 PLC 程序大都用梯形图编写，并有相应的软件支持，如 FANUC 0iC/0iD 系统用 LADDER Ⅲ软件，SINUMERIK 802D/802Dsl 系统用 S7-200 软件等。一台数控机床的 PLC 程序通常由以下部分组成：

1）机床急停保护。

2）机床轴超程保护。

3）机床操作方式选择。

4）系统功能选择。

5）主轴倍率和进给倍率。

6）主轴控制。

7）选刀和换刀。

8）冷却和润滑。

9）PLC 报警等。

7.2 输入、输出开关信号

7.2.1 输入开关信号

1. 控制开关

控制开关通常分布在机床操作面板上，通过人为操控使外部电路通断，以实现某个控制功能。图 7-2 所示为数控机床常用的各类开关。

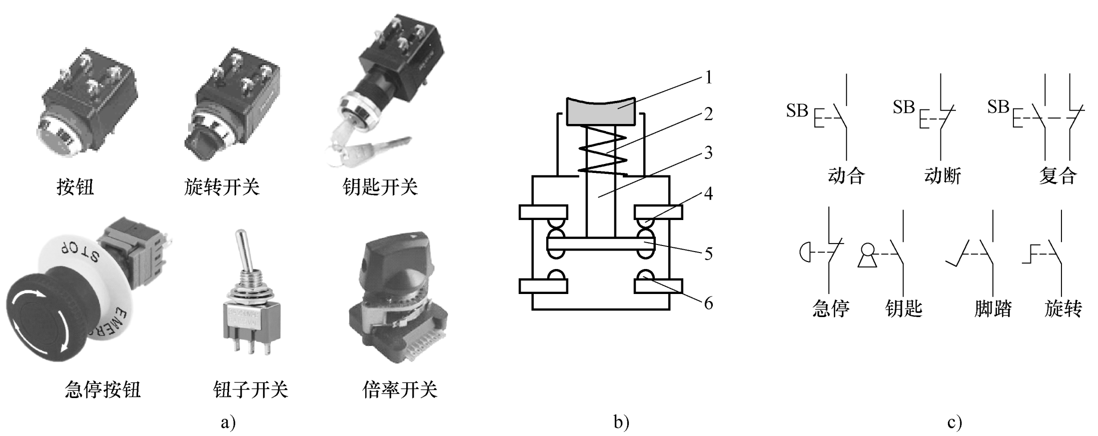


图 7-2 数控机床常用各类开关

a）各类开关外观 b）按钮动作原理 c）开关符号

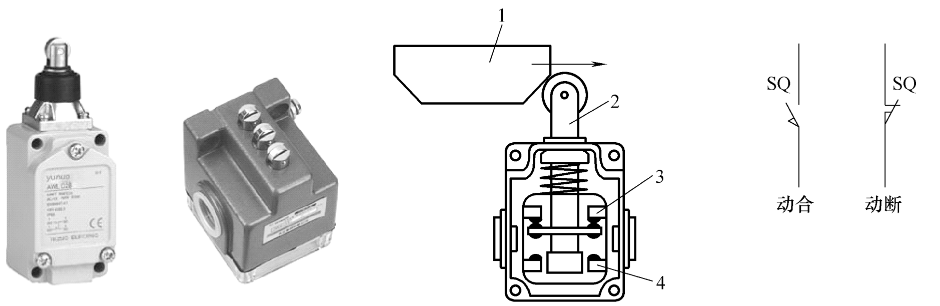
1—按钮帽 2—复位弹簧 3—推杆 4—动断（常闭）触点 5—桥板 6—动合（常开）触点

按钮按下去之前，外部电路断开，按钮按下去之后，外部电路接通，此触点为动合触点（常开触点）；按钮按下去之前，外部电路接通，按钮按下去之后，外部电路断开，此触点为动断触点（常闭触点）。

按钮通常用于机床上有关动作的执行和停止，如主轴起动和停止、切削液开和关等；旋转开关、钮子开关常用于机床状态选择，如自动和手动操作选择、坐标轴选择等；钥匙开关用于系统数据保护；脚踏开关用于数控车床液压尾座顶尖伸出和退回、液压卡盘夹紧和松开；急停按钮在紧急状态下切断电源电路，使机床动作停止，急停按钮只有动断触点；倍率开关用于主轴倍率、进给倍率及操作方式选择等，倍率开关处在不同位置时，开关触点的通、断组合构成二进制码，对应不同的状态。

2. 行程开关

行程开关又称限位开关，它将机械位置转变为开关信号。图7-3所示为机床中常用的滚轮柱塞式行程开关。行程开关的动作过程与控制按钮类似，只是用移动部件上的撞块来触碰行程开关上的柱塞，行程开关触点的分合速度取决于撞块的移动速度。行程开关在数控机床上主要用于坐标轴的限位、移动部件的定位等。



a)　　　b)　　　c)

图7-3　机床中常用的滚轮柱塞式行程开关

a）滚轮柱塞式行程开关　b）行程开关动作原理　c）符号

1—撞块　2—柱塞　3—动断触点　4—动合触点

3. 电感式接近开关

接近开关是一种非接触式的电子开关，常用的是电感式接近开关（图7-4）。接近开关具有体积小、灵敏度高、频率响应快、重复定位精度高、工作稳定可靠及使用寿命长等优点。在数控机床上，电感式接近开关常用于刀库、机械手、加工中心主轴松紧刀等机构的位置检测，以及主轴一转信号的检测等。

电感式接近开关前端的感辨头内有一个线圈，壳体内有高频振荡器及信号处理电路。高频振荡器产生的高频励磁电流在线圈中产生交变磁场，当导磁的金属物体接近感辨头到一定距离时，金属表面产生电涡流，电涡流产生的磁场又反作用于感辨头的磁场，使高频励磁电流减小，信号处理电路对励磁电流的大小进行检测后，输出开关信号。感应铁片使开关接通和断开的移动距离之差称为迟滞距离。接近开关输出有较大的带载能力，可直接驱动继电器线圈。另外，接近开关输出信号有NPN或PNP形式，在与I/O模块输入端连接时，应注意接线形式。接近开关通常带有电源和开关通断状态的指示灯。

4. 磁感应式开关

磁感应式开关又称磁敏开关，主要对气缸活塞位置进行非接触式检测，如图7-5所示。固定在活塞上的磁性环随活塞运动到磁感应开关位置时，由于其磁场的作用，使开关内振荡线圈的电流发生变化，内部放大器将电流转换成输出开关信号。根据气缸形式的不同，磁感

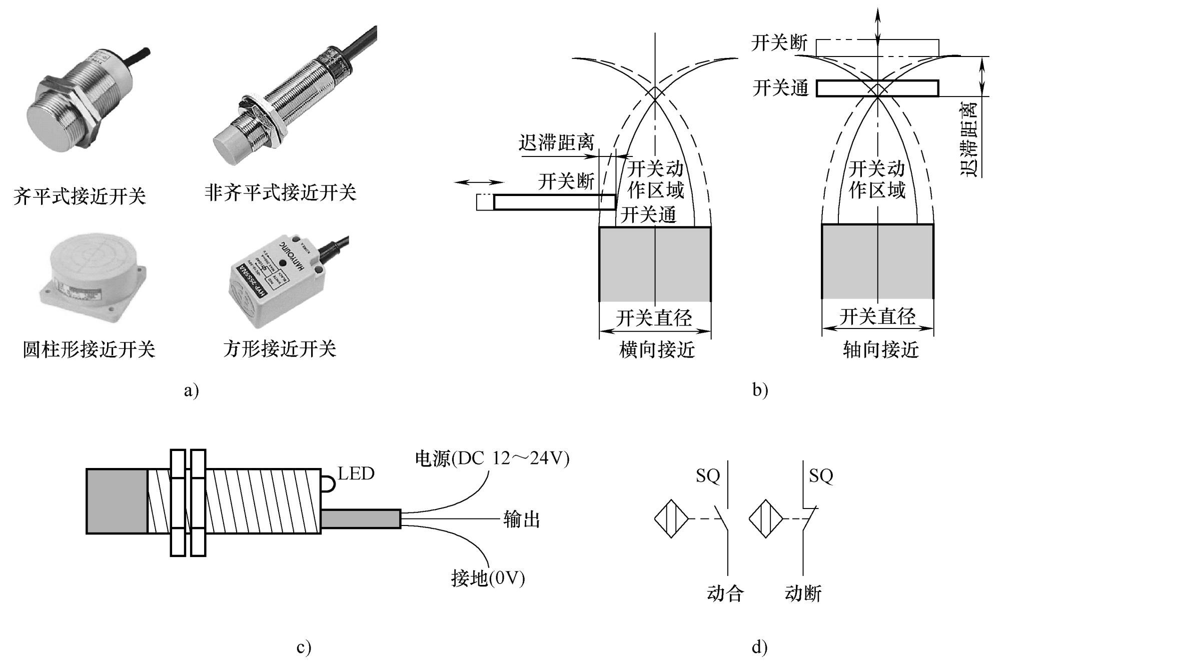


图 7-4　电感式接近开关

a）类型　b）动作原理　c）接线　d）符号

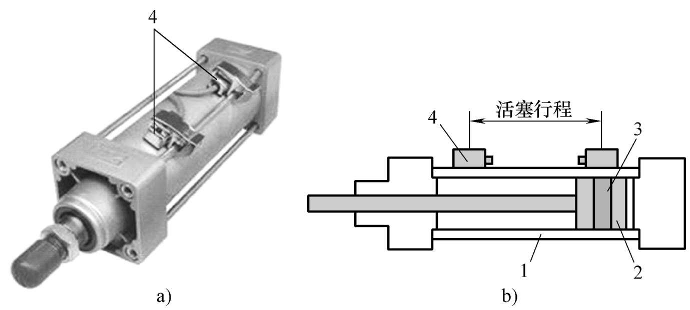


图 7-5　磁感应式开关

a）安装在气缸上的磁感应开关　b）气缸活塞行程控制

1—缸筒　2—活塞　3—磁环　4—磁感应开关

应开关有绑带式安装和支架式安装等类型。

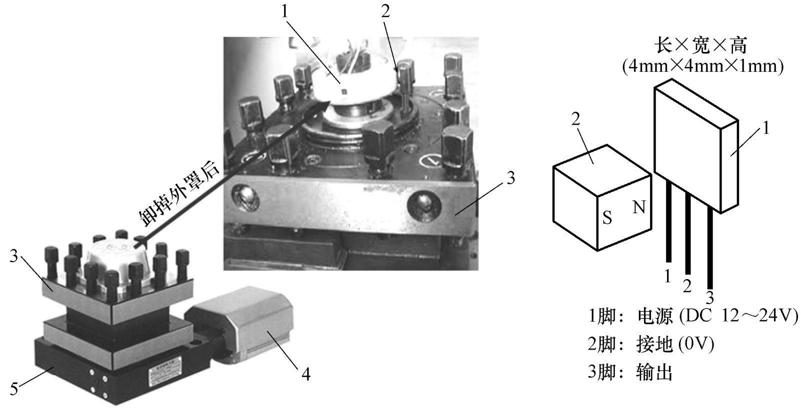
5. 霍尔开关

霍尔开关是将霍尔元件、放大电路及开关电路等集成在一个芯片上的集成电路，常用于数控车床四方电动刀架的刀位检测，如图 7-6 所示。

当磁铁远离霍尔开关时，霍尔开关感应到磁场强度小，霍尔开关处于关断状态；当磁铁靠近霍尔开关时，霍尔开关感应到磁场强度大，霍尔开关接通。有关四方电动刀架的换刀过程参见第 1.3.1 节。

6. 光电开关

光电开关是一种用来检测物体靠近、通过等状态的光电传感器，具有抗干扰能力强、感



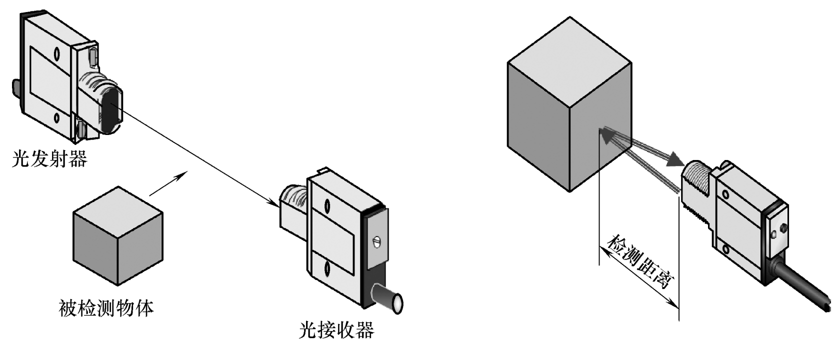
a)　　　　b)

图 7-6　霍尔开关

a）数控车床四方电动刀架中的霍尔开关　b）动作原理

1—霍尔开关集成电路　2—磁铁　3—刀架　4—刀架电动机　5—刀座

应距离长及动作灵敏等特点。在数控机床中，光电开关用于检测物体的定位、限位及计数等场合，常用的光电开关有遮断式和反射式，如图 7-7 所示。



a)　　　　b)

图 7-7　光电开关

a）遮断式　b）反射式

遮断式光电开关由相互分离且相对安装的光发射器和光接收器组成。当被检测物体位于发射器和接收器之间时，红外光线被阻断，接收器接收不到红外线而产生开关信号。反射式光电开关集发射和接收为一身，定区域反射式光电开关有一个非常确定的检测区域，不经过该区域的被测物体不会引起光电开关的动作。其他反射式光电开关还有散射型和反射镜反射型等。

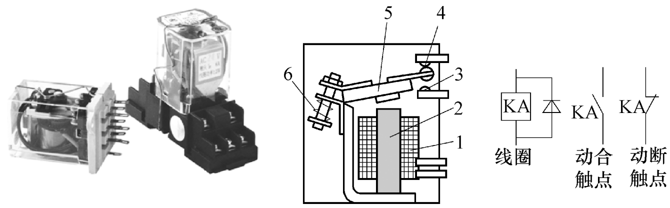
此外，在数控机床的润滑、冷却及气液压系统中，安装有液位开关、流量开关及压力开关等，对润滑油箱和液压油箱的液位、气液压管道中的流量和压力进行检测，以保证机床稳定、可靠地运行。有关液位开关、流量开关和压力开关的类型和原理请读者参考相关资料。

7.2.2　输出开关信号

1. 继电器

继电器（图 7-8）是一种根据外界信号来控制电路通断的电磁开关，常用于控制电路

的通断。



a) b) c)

图 7-8 继电器

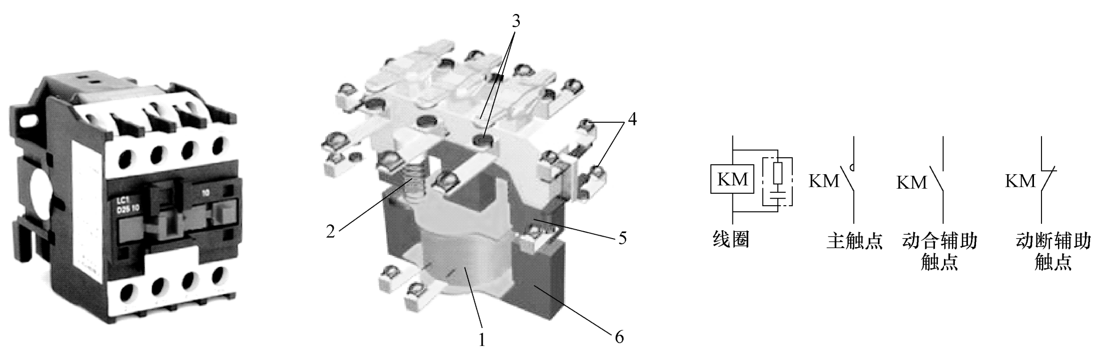
a）外观 b）结构 c）符号

1—线圈 2—铁心 3—动合触点 4—动断触点 5—衔铁 6—复位弹簧

继电器由线圈和触点组成，线圈电压为 DC 24V，有多组动合和动断触点，如图 7-8b 所示。继电器线圈得电时，线圈产生的磁场吸合衔铁，使接在控制电路中的动合触点或动断触点动作，从而控制电路的通断。继电器线圈上要反向并联续流二极管，以便当线圈断电时为线圈中的感应电流提供放电回路。

2. 接触器

接触器（图 7-9）也是一种电磁开关，常用于主电路的通断。接触器由线圈和触点组成，线圈电压有单相交流 110V 和 220V，其主触点接在主电路中以承载大的负载电流，辅助触点接在控制电路中。



a) b) c)

图 7-9 接触器

a）外观 b）结构 c）符号

1—线圈 2—复位弹簧 3—主触点 4—辅助触点 5—动铁心 6—静铁心

当接触器线圈接通电源时，线圈电流产生磁场，使静铁心产生足以克服弹簧反作用力的吸力，将动铁心向下吸合，使主触点闭合，主触点将主电路接通；当接触器线圈断电时，静铁心吸力消失，动铁心在弹簧力的作用下复位，主触点复位，主电路断开。接触器还有一组动合和动断辅助触点，用于控制电路的通断。为了给线圈断电时提供放电回路，在线圈两端并联阻容吸收装置。

3. 电磁换向阀

在液压和气动系统中，电磁换向阀用来控制流体的方向，使液压缸或气缸活塞动作方向

发生改变，如数控车床液压尾座中顶尖的伸出和缩进，液压卡盘的夹紧和松开；加工中心主轴松紧刀气缸，斗笠式刀库刀盘推出和缩回气缸等。图 7-10 所示为数控机床液压工作站及电磁换向阀，图 7-11 所示为气动系统电磁换向阀。

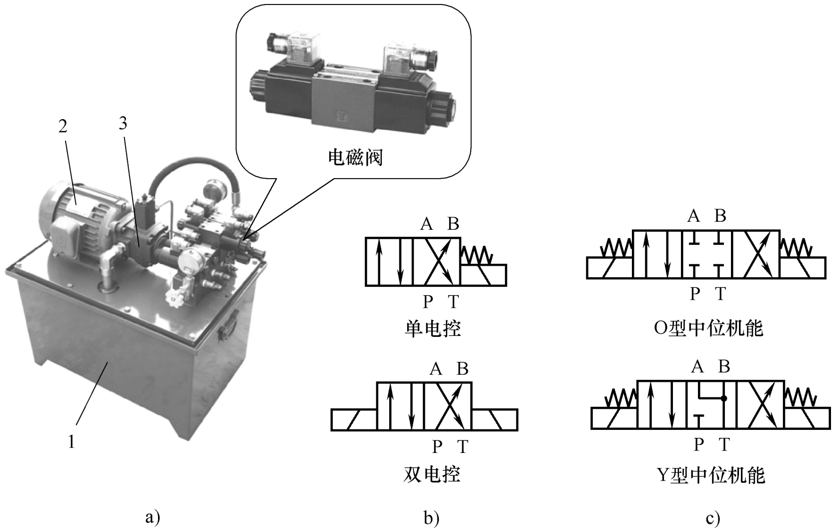


图 7-10　数控机床液压工作站及电磁换向阀

a）液压工作站　b）二位四通电磁换向阀　c）三位四通电磁换向阀

1—油箱　2—电动机　3—液压泵

在图 7-10b 中，二位四通电磁换向阀不能使液压缸活塞在任意位置停止运动。单电控二位四通电磁换向阀的换向靠一个线圈的得电和失电来控制，线圈失电时滑阀靠弹簧复位；双电控二位四通电磁换向阀的换向靠两个线圈的轮流得电和失电来控制。

在图 7-10c 中，三位四通电磁阀能使液压缸活塞在任意位置停止运动。双电控三位四通电磁换向阀的换向靠两个线圈的轮流得电和失电来控制，当两个线圈同时失电时，滑阀在两个弹簧的作用下处于中位，在 O 型中位机能中，阀的各油口关闭，系统保持压力；在 Y 型中位机能中，液压缸两腔与回油路连通。

图 7-11 中，单电控二位五通电磁换向阀线圈得电时，1—4 口进气，2—3 口排气；线圈失电时，滑阀在弹簧作用下复位，1—2 口进气，4—5 口排气。双电控二位五通电磁换向阀的换向靠两个线圈的轮流得电和失电来控制。

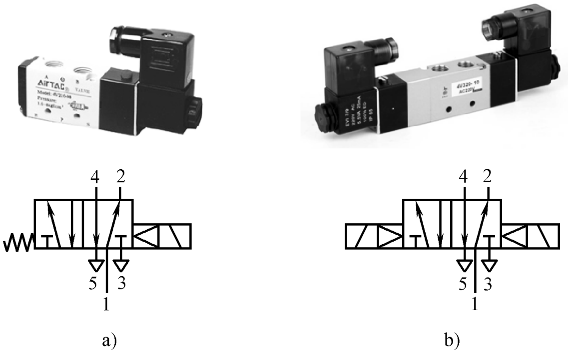


图 7-11　气动系统电磁换向阀

a）单电控二位五通电磁换向阀

b）双电控二位五通电磁换向阀

有关数控机床中的气动和液压控制可参考第 1 章中的相关内容。

7.3 FANUC 数控系统 PMC

7.3.1 PMC I/O 模块

1. 类型

在 FANUC 数控系统中，PMC（Programmable Machine Controller）是可编程序机床控制器的简称，是专门用于数控机床开关控制的控制器，其基本功能与可编程序逻辑控制器（PLC）是一样的，只是另外有专门用于数控机床控制的特殊功能，以及与 CNC 的接口信号。目前 FANUC 系统的 PMC 均为内装型，其硬件和软件都作为数控系统的基本组成部分，与数控系统一起统一设计制造。外部输入/输出开关是通过 I/O 模块与数控系统建立联系的，FANUC 数控系统的 I/O 模块有标准机床操作面板模块、操作盘 I/O 模块、外置 I/O 单元、分线盘 I/O 模块等，如图 7-12 所示。

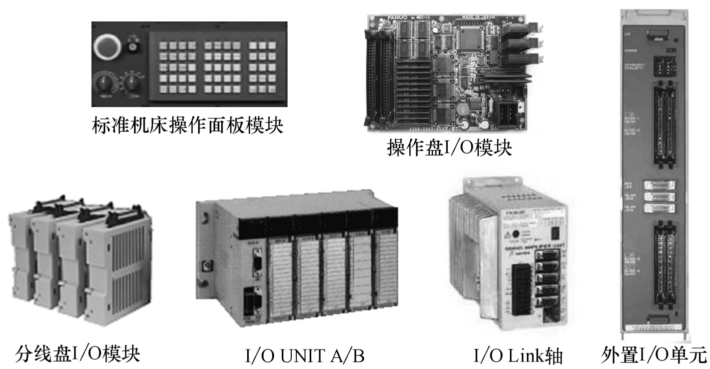


图 7-12　I/O 模块

I/O 模块类型主要是根据输入/输出信号点的数量来进行选择的。例如：操作盘 I/O 模块输入/输出点数为 48/32，外置 I/O 单元输入/输出点数为 96/64。I/O 模块都有固定地址的针脚，通过连接器及端子板与外部开关连接。另外，I/O Link 轴是一种专门的伺服放大器，由其驱动的轴受 PMC 控制，不与其他伺服轴联动，I/O Link 轴可实现分度或定位控制，常用于刀库选刀等控制场合。

2. PMC 的组成

FANUC 0i 系列数控系统的 PMC 采用 I/O Link 总线控制。图 7-13 所示为 FANUC 0iC 系统 PMC 控制的组成。

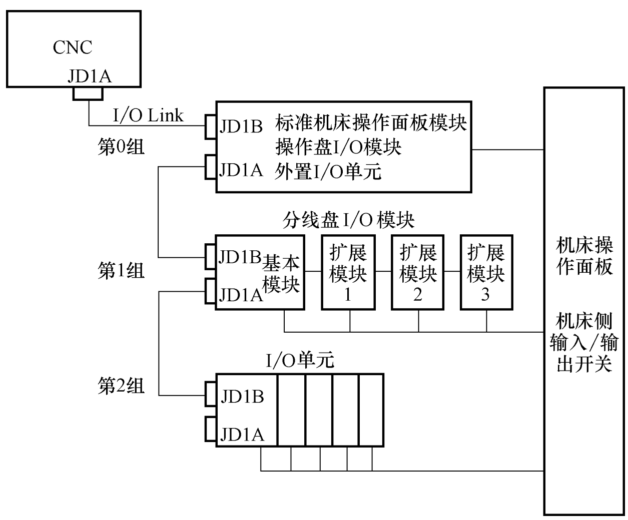


图 7-13　FANUC 0iC 系统 PMC 控制的组成

在 FANUC 0iC 系统中，I/O Link 总线是 JD1A 和 JD1B 两端口之间的连接，数控系统为主控端，所有 I/O 模块均为从控端，离主控端最近的从控端称为第 0 组，依次类推，最多带 16 组（第 0~15 组）。第 0 组连接的 I/O 装置可以是标准机床操作面板模块、外置 I/O 单元及操作盘 I/O 模块等。

3. PMC 信号

PMC 控制是以梯形图的形式来实现的，梯形图中用到的信号如图 7-14 所示。

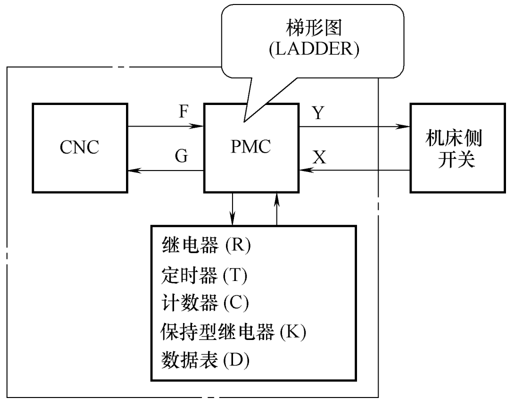


图 7-14　PMC 信号

PMC 信号分外部信号和内部信号，外部信号就是和外部开关通断状态有关的信号，X 地址表示输入开关，Y 地址表示输出开关；内部信号有两个方面，一是 PMC 与 CNC 之间的接口信号，反映了 CNC 和 PMC 运行的状态，其中，CNC 输出到 PMC 的是 F 地址信号，PMC 输入到 CNC 的是 G 地址信号；二是 PMC 自身功能信号，如内部继电器 R、定时器 T、计数器 C、保持型继电器 K 及数据表 D 等。实现 PMC 控制的程序是梯形图。

7.3.2　PMC 地址

1. 输入/输出开关地址

在 PMC 中，一个地址的信息包括三个方面，即地址类型、字节和位。X 地址对应机床侧的输入开关信号，如按钮、行程开关、接近开关、压力开关等，每个输入开关可定义一个 X 地址；Y 地址对应机床侧的输出开关信号，如继电器、指示灯等，每个输出开关可定义一个 Y 地址。图 7-15 所示为外部开关与 PMC 输入/输出地址的对应关系。

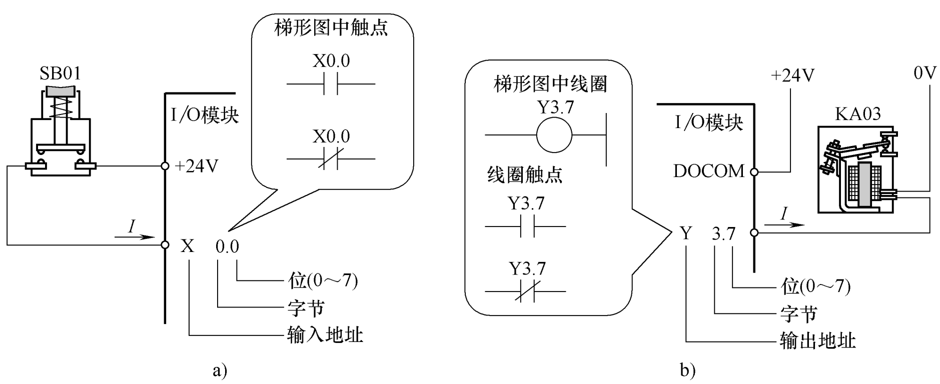


图 7-15　PMC 地址
a）输入地址　b）输出地址

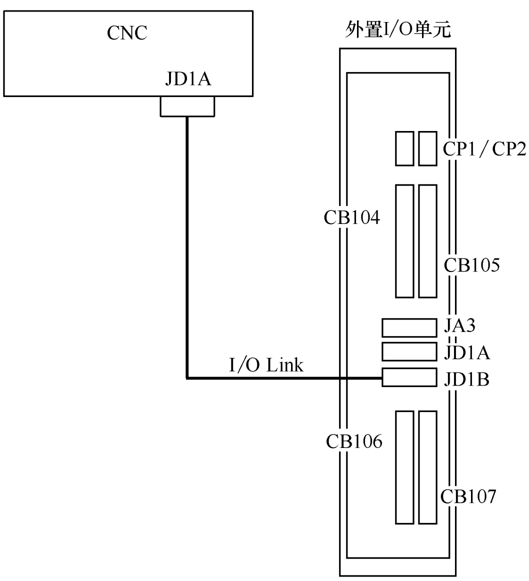
例如：外部按钮 SB01 对应输入地址 X0.0，X0.0 表示输入地址为第 0 字节的第 0 位，该地址为一个“位”信号，在梯形图中用常开触点或常闭触点来表示，触点接通或断开用“1”或“0”表示，对常开触点，SB01 未接通时 X0.0 置“0”（X0.0=0），触点断开；SB01 接通时 X0.0 置“1”（X0.0=1），触点闭合。同样地，外部继电器 KA03 对应输出

地址 Y3.7，Y3.7 表示输出地址为第 3 字节的第 7 位，该地址为一个“位”信号，在梯形图中用线圈和触点来表示，当线圈 Y3.7 置“1”（Y3.7=1）时，继电器 KA03 线圈接通，继电器触点动作；当线圈 Y3.7 置“0”（Y3.7=0）时，继电器 KA03 线圈断开；在线圈 Y3.7 通、断的同时，Y3.7 触点闭合或断开，通常在梯形图控制电路中起自锁和互锁的作用。

要说明的是，有些开关的输入地址是固定的，如急停按钮固定地址为 X8.4（助记符 *ESP，* 为低电平有效），第 1～4 轴回参考点减速开关固定地址为 X9.0～X9.3（*DEC1～*DEC3）等。

2. PMC 地址定义

每个输入/输出开关在 PMC 中的地址定义是有规则的。图 7-16a 所示为外置 I/O 单元的端口，图 7-16b 所示为外置 I/O 单元的 X 和 Y 地址定义。



a)

CB104

1	0V	+24V
2	Xm+0.0	Xm+0.1
3	Xm+0.2	Xm+0.3
4	Xm+0.4	Xm+0.5
5	Xm+0.6	Xm+0.7
6	Xm+1.0	Xm+1.1
7	Xm+1.2	Xm+1.3
8	Xm+1.4	Xm+1.5
9	Xm+1.6	Xm+1.7
10	Xm+2.0	Xm+2.1
11	Xm+2.2	Xm+2.3
12	Xm+2.4	Xm+2.5
13	Xm+2.6	Xm+2.7
14		
15		
16	Yn+0.0	Yn+0.1
17	Yn+0.2	Yn+0.3
18	Yn+0.4	Yn+0.5
19	Yn+0.6	Yn+0.7
20	Yn+1.0	Yn+1.1
21	Yn+1.2	Yn+1.3
22	Yn+1.4	Yn+1.5
23	Yn+1.6	Yn+1.7
24	DOCM	DOCM
25	DOCM	DOCM

CB105

1	0V	+24V
2	Xm+3.0	Xm+3.1
3	Xm+3.2	Xm+3.3
4	Xm+3.4	Xm+3.5
5	Xm+3.6	Xm+3.7
6	Xm+8.0	Xm+8.1
7	Xm+8.2	Xm+8.3
8	Xm+8.4	Xm+8.5
9	Xm+8.6	Xm+8.7
10	Xm+9.0	Xm+9.1
11	Xm+9.2	Xm+9.3
12	Xm+9.4	Xm+9.5
13	Xm+9.6	Xm+9.7
14		
15		
16	Yn+2.0	Yn+2.1
17	Yn+2.2	Yn+2.3
18	Yn+2.4	Yn+2.5
19	Yn+2.6	Yn+2.7
20	Yn+3.0	Yn+3.1
21	Yn+3.2	Yn+3.3
22	Yn+3.4	Yn+3.5
23	Yn+3.6	Yn+3.7
24	DOCM	DOCM
25	DOCM	DOCM

b)

图 7-16　外置 I/O 单元

a）端口　b）X 和 Y 地址定义

图 7-16a 中，CP1/CP2 外接+24V 电源，JA3 接手轮，JD1A 通过 I/O Link 总线连接下一个 I/O 模块，CB104～CB107 为输入/输出地址端口。

图 7-16b 中，m 和 n 分别为 X 和 Y 地址的首字节，在确定 I/O 模块时设定，如设 m=0 和 n=0，即输入/输出地址首字节为 0，则 CB104 端口 2 号针脚 A（表示为 A2）的地址规定为输入地址 X0.0，2 号针脚 B（表示为 B2）的地址规定为输入地址 X0.1；CB105 端口 23 号针脚 A（表示为 A23）的地址规定为输出地址 Y3.6，23 号针脚 B（表示为 B23）的地址规定为输出地址 Y3.7。I/O 模块 X、Y 地址确定后，每个地址与外部开关的对应关系也就确定了。

3. 输入/输出开关接线

FANUC 系统 PMC 输入/输出开关的接线有源型和漏型方式，通常采用源型输入和源型输出的接线方式。图 7-17 所示为某数控车床外置 I/O 单元部分的 I/O 电气图及接线。

在图 7-17a 所示的源型输入接线方式中，外部输入开关一端接 I/O 模块的+24V 端，当外部开关接通时，电流由开关流入 I/O 模块输入 X 地址；在图 7-17b 所示的源型输出接线方式中，I/O 模块上的 DOCOM 端外接+24V 外部电源，当 I/O 模块有输出信号时，外部电路接通，电流由 I/O 模块输出地址 Y 流出。

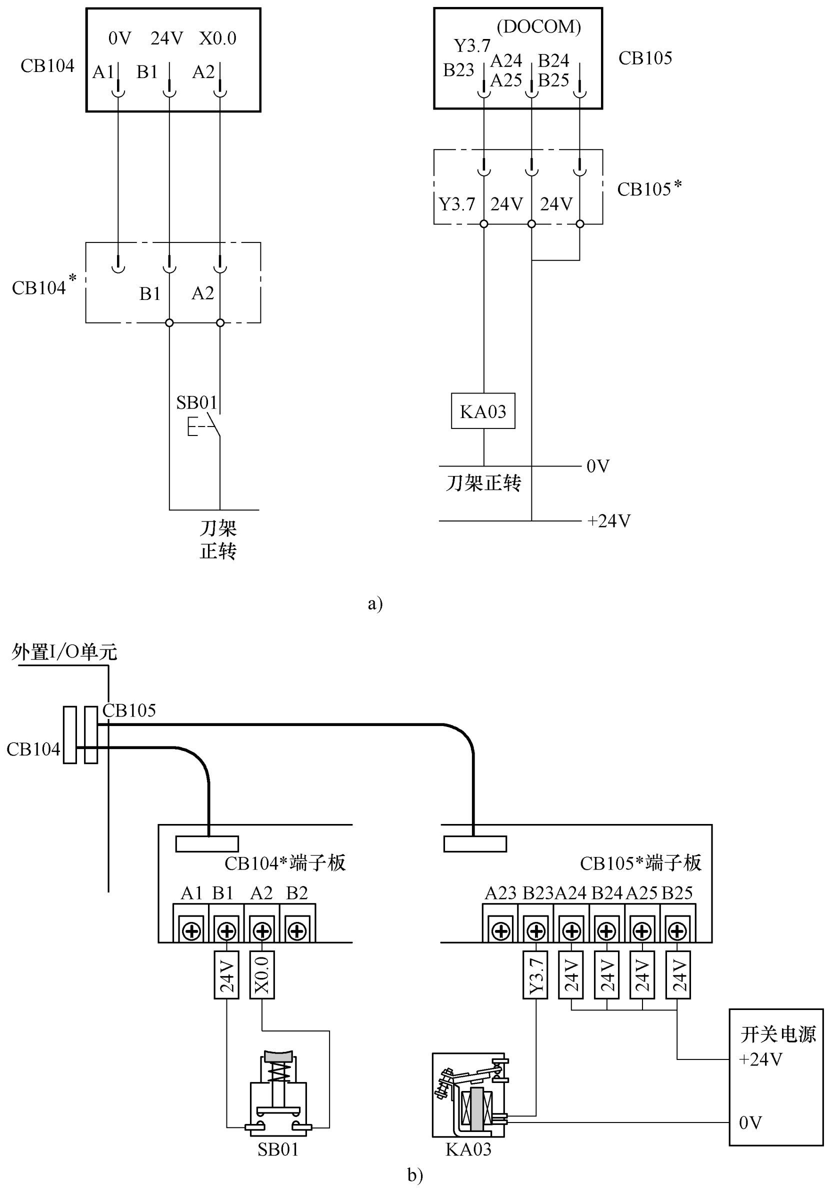


图 7-17　I/O 电气图及接线

a）I/O 电气图　b）接线

PMC 输出的晶体管开关信号由于带载能力的限制，不能直接驱动主电路中的接触器、电磁阀及电磁抱闸等线圈，需要通过继电器来过渡，以控制电路中的小电流来获得主电路中的大电流，如图 7-18 所示。

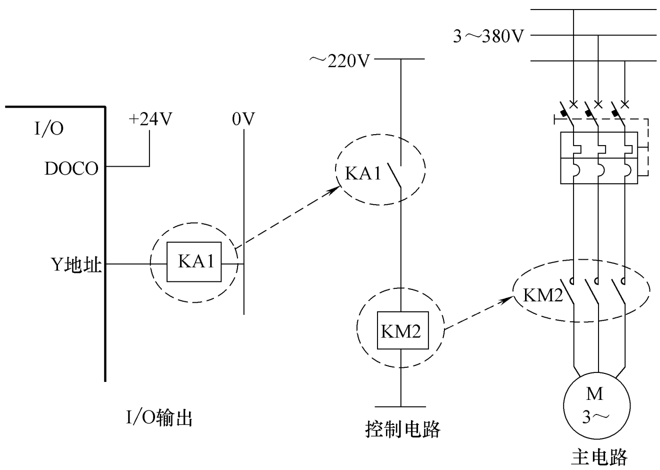


图 7-18　PMC 输出控制

7. 3. 3　PMC 程序

1. CNC 与 PMC 的接口信号梯形图

数控机床 PLC 控制与通用 PLC 控制的最大区别在于，数控机床 PLC 除了执行与通用 PLC 相同的外部开关逻辑控制外，还必须与 CNC 进行信号交换。一方面，PLC 将当前的状态告诉 CNC，使 CNC 执行相应的数控功能；另一方面，CNC 将当前的数控功能通知 PLC，使 PLC 执行相应的逻辑控制。CNC 与 PLC 之间交换的信号称为接口信号，数控系统对每个接口信号有规定的地址和功能，完善的接口信号是数控系统正常运行的重要保证，也是数控系统故障诊断的重要手段。FANUC 0i 系统中，PMC 到 CNC（PMC→CNC）的信号地址为 G，在梯形图中为线圈输出；CNC 到 PMC（CNC→PMC）的信号地址为 F，在梯形图中为触点输入。以“循环起动”和“进给暂停”控制为例，其接口信号和梯形图如图 7-19 所示。

当按下机床操作面板上的“循环起动”按钮（X6. 1）后，接口信号 G7. 2 置“1”，一方面，数控系统接收到 G7. 2 = 1 的信号后，即执行加工程序，经插补运算和数据处理，通过主轴串行总线（或模拟信号）和伺服串行总线，使主轴和进给按加工程序指令规定的要求运动，并实现位置控制和速度控制；另一方面，数控系统输出接口信号 F0. 5，并使 F0. 5 置“1”，PMC 接收到 F0. 5 = 1 信号后使 Y6. 1 置“1”，循环起动指示灯点亮。

当按下机床操作面板上的“进给暂停”按钮（X6. 0）后，接口信号 G8. 5 置“0”（G8. 5 信号规定低电平有效），数控系统接收到 G8. 5 = 0 信号后，即终止执行进给运动；同时，数控系统输出接口信号 F0. 4，并使 F0. 4 置“1”，经 PMC 使 Y6. 0 置“1”，进给暂停指示灯点亮。更详细的 CNC 与 PMC 的接口信号说明可参阅数控系统的技术手册。

2. 串行主轴 M03、M04 和 M05 控制

串行主轴是指数控系统与主轴驱动器之间通过数字串行总线进行数据交换，实现对主轴

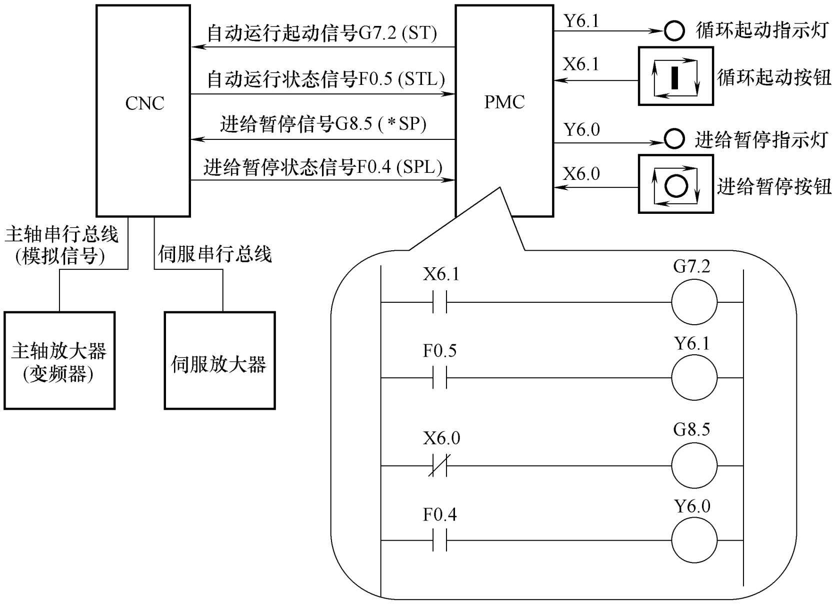


图 7-19　“循环起动”和“进给暂停”的接口信号及梯形图

正、反转和停止等控制。一方面，数控系统接收到 S 指令后，数控系统根据主轴传动比等参数，计算出主轴电动机的转速，经串行主轴总线传输给主轴驱动器，再由主轴驱动器拖动主轴电动机实现与 S 指令匹配的转速 n_M；另一方面，数控系统接收到 M03、M04 和 M05 指令后，通过 CNC 与 PMC 之间的接口信号，由 PMC 进行逻辑控制，并将控制结果由 CNC 经串行主轴总线传输给主轴驱动器，实现主轴电动机的正、反转或停止控制。串行主轴正、反转和停止 PMC 信号如图 7-20 所示，PMC 梯形图如图 7-21 所示。

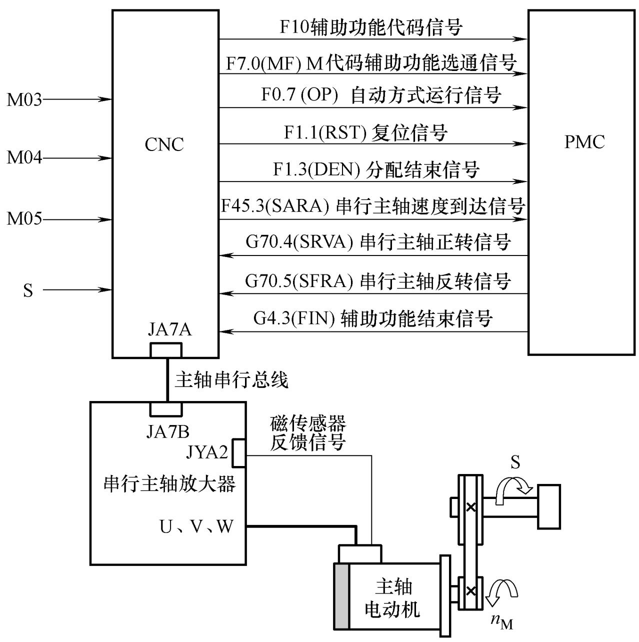


图 7-20　串行主轴正、反转和停止 PMC 信号

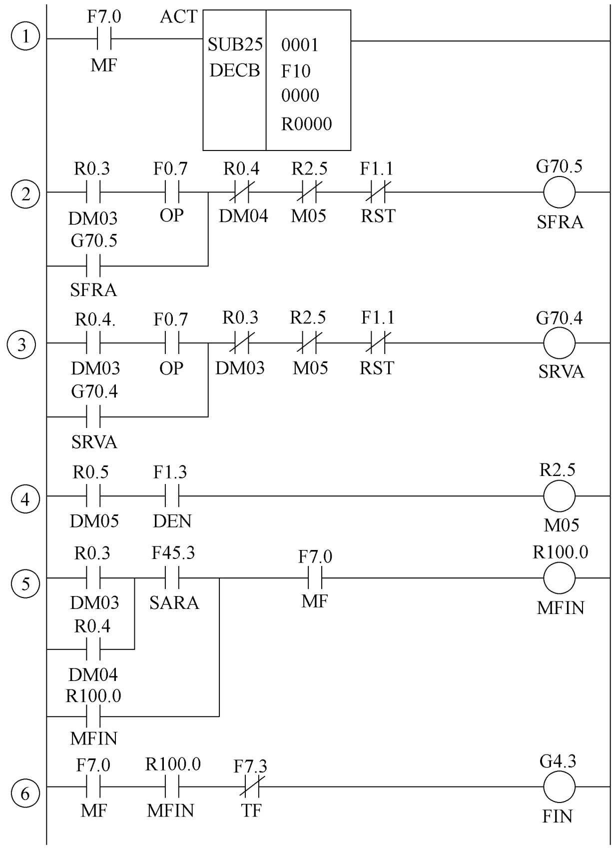


图 7-21　串行主轴正、反转和停止 PMC 梯形图

梯形图说明：

①行：系统执行 M03、M04 或 M05 指令时，CNC 一方面向 PMC 发出 M 代码选通信号 F7.0 为“1”；另一方面将辅助功能 M 指令的二进制代码 F10 发送至 PMC。PMC 执行译码指令（DECB），把 M 代码信息译成 R 继电器触点信号。本例中，M03 用 R0.3 表示，M04 用 R0.4 表示，M05 用 R0.5 表示。

②、③行：是有关主轴正、反转控制的梯形图，该梯形图是典型的“起、保、停”形式。其中，系统处于自动运行方式时，CNC 发出信号 F0.7 为“1”，表示当前控制为自动方式；R0.3、R0.4 触点分别用于主轴正转或反转起动，由 G70.5 或 G70.4 线圈输出给 CNC，其触点对 R0.3 或 R0.4 进行自锁。CNC 接收到 PMC 发出的 G70.5 或 G70.4 信号，并经系统控制软件处理后，由主轴串行总线将主轴电动机的转向信号传输至主轴驱动器，再由主轴驱动器带动主轴电动机反转或正转起动（因为主轴电动机与主轴之间有一级传动，所以主轴电动机反转即为主轴正转，反之亦然）。主轴正转或反转停止由下列信号之一控制：一是正、反转互锁信号（R0.3 与 R0.4 互锁）；二是复位信号（系统复位按键，以及 M02、M30 代码，F1.1 置“0”）；三是主轴停止信号 R2.5。

④行：该行是主轴停止梯形图，加入了系统分配结束信号 F1.3。在执行 M05 指令时，如果移动指令（G01、G02 或 G03）与 M05 在同一程序段中，由 F1.3 保证在执行完移动指

令后再执行 M05 指令，进给结束后主轴才停止，避免在进给过程中因主轴突然停止而产生“抗刀”现象。

⑤行：执行 M03 或 M04 指令后，主轴起动加速或反转起动加速，CNC 通过主轴电动机中的磁传感器和主轴串行总线检测主轴电动机实际速度，当实际速度到达指令速度时，CNC 向 PMC 发出主轴速度到达信号，F45. 3 置“1”，同时，R100. 0 置“1”，表示 M03 或 M04 指令执行完成。

⑥行：F7. 3 是有关刀具 T 代码功能选通信号。R100. 0 置“1”，PMC 向 CNC 发出辅助功能结束信号，G4. 3 置“1”，CNC 接收到 G4. 3 信号，并经过系统设定的辅助功能结束延时时间（标准设定为 16ms）后，M 代码选通信号 F7. 0 复位，则 G4. 3 也复位。同时，在①行中，F7. 0 复位后，切断 M 代码指令输出信号，系统准备读取下一条 M 代码指令。

3. 数控车床四方电动刀架 T 指令选刀控制

数控车床四方电动刀架的结构及动作过程参见第 1 章 1. 3. 1。数控系统接收到 T 指令后，经 PMC 控制，输出控制信号使刀架电动机旋转，刀架的选刀过程包括刀架抬起、刀架转位选刀、刀架定位反靠和刀架下降夹紧四个过程。刀架选刀由四个霍尔开关进行检测。四方电动刀架中的霍尔开关及 PMC 地址如图 7-22 所示，图 7-23 所示为刀架选刀 PMC 梯形图。

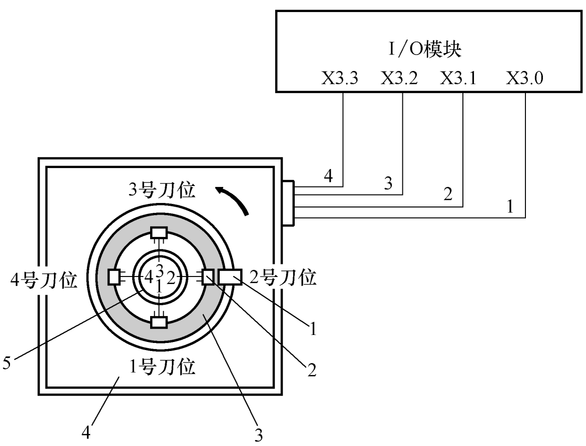


图 7-22　四方电动刀架中的霍尔开关及 PMC 地址

1—磁钢　2—霍尔开关（4 个）　3—发信盘　4—刀架体　5—空心主轴

①行：T 指令执行使能 R119. 0 置“1”，刀架电动机具有起动条件。使能有两个条件：一是 T 指令选通信号 F7. 3 置“1”；二是 T 指令必须在执行完移动指令后进行，F1. 3 置“1”。

②、③和④行：实际刀位检测由二进制编码组成。

R120. 2	R120. 1	R120. 0	
0	0	1	X3. 0 = 1 →T1
0	1	0	X3. 1 = 1 →T2
0	1	1	X3. 2 = 1 →T3
1	0	0	X3. 3 = 1 →T4

⑤行：MOVE 指令是把比较数据和处理数据进行逻辑“与”运算，并将结果传输到指

定地址。图 7-23 所示的梯形图中，处理数据为 00000111，比较数据为 R120 地址中的二进制码，指定地址是 K001。MOVE 执行的结果是，将 R120 地址中的二进制码与 00000111 逻辑“与”后，R120 中的低 3 位传输到保持型继电器 K001 地址中。K001 中的数值即为实际刀位，随刀架的转动而变化。

⑥COIN 为比较指令，用来检查参考值与比较值是否一致。图 7-23 所示的梯形图中，CNC 将 T 指令译码后生成二进制码，存入 F26 地址中，并发送给 PMC，F26 中的数值为指令刀位。COIN 指令执行的结果是，当实际刀位等于指令刀位时，COIN 指令输出 R130.2 置“1”，表示选刀完成，刀架电动机停止转动。

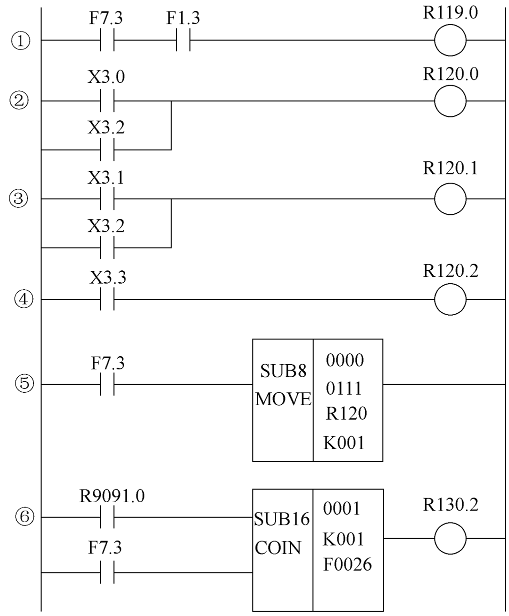


图 7-23　刀架选刀 PMC 梯形图

数控车床转塔刀架、加工中心斗笠式刀库、圆盘式刀库及链式刀库的选刀和换刀 PMC 控制，涉及刀库旋转指令（ROTB）、检索指令（DSCHB）和数据传送指令（XMOVB）及换刀宏程序等，有些还具有刀库和刀具寿命管理功能，请读者参考有关资料。

7.4　SINUMERIK 802Dsl 数控系统 PLC

7.4.1　PP72/48 I/O 模块

1. 数字量输入/输出地址

SINUMERIK 802Dsl 数控系统通过 PROFIBUS-DP 总线和 PP72/48 I/O 模块实现机床外围辅助功能的控制，PLC 控制功能相当于 S7-200。PP72/48 I/O 模块如图 7-24 所示。

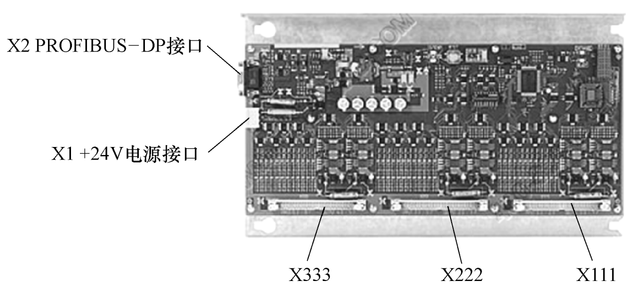


图 7-24　PP72/48 I/O 模块

PP72/48 I/O 模块有三个 50 芯插槽 X333、X222 和 X111，每个插槽有 24 位数字量输入和 16 位数字量输出，总计有 72 位数字量输入和 48 位数字量输出。数字量输入地址用“I×.×”表示，“×.×”为字节和位，如 I0.0 表示输入地址 0 字节第 0 位，输入地址与外部输入

开关相对应；数字量输出地址用“Q×. ×”表示，“×. ×”为字节和位，如 Q0. 0 表示输出地址 0 字节第 0 位，输出地址与外部输出开关相对应。图 7-25 所示为输入/输出地址及 PLC 梯形图。

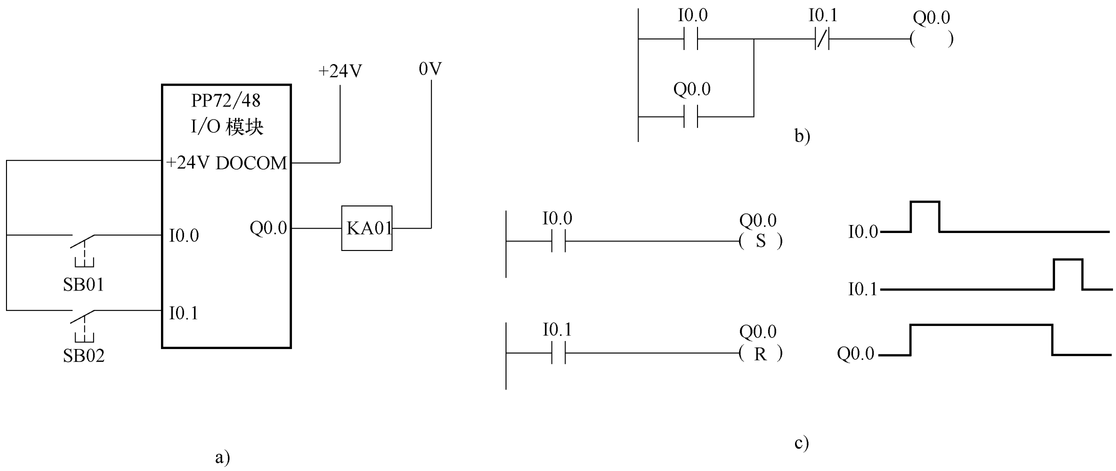


图 7-25　输入/输出地址及 PLC 梯形图

a）输入/输出地址及接线　b）“起、保、停”梯形图　c）置位/复位梯形图及时序图

2. PLC 与 CNC 接口信号

PLC 与 CNC 之间的接口信号用 V 地址来指定，每个 V 地址有固定的功能定义。以轴限位控制为例，如图 7-26 所示。

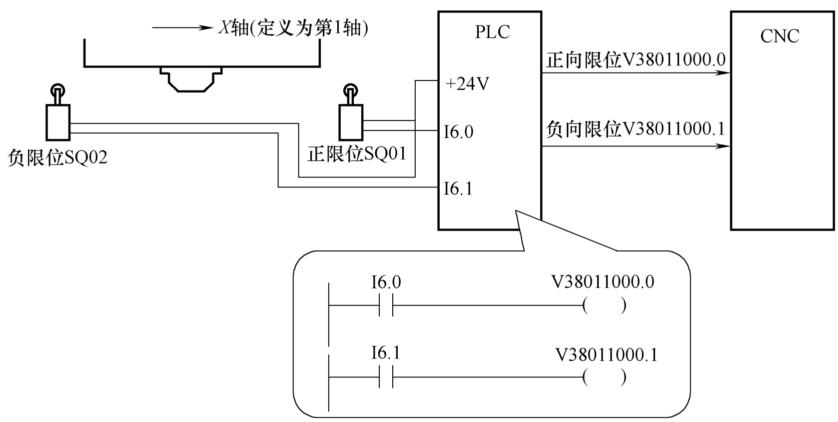


图 7-26　轴限位 PLC 控制及接口信号

当 X 轴撞到正向限位或负向限位时，限位开关触发接口信号 V38011000. 0 或 V38011000. 1 置“1”，由 PLC 发送给 CNC，CNC 一旦接收到该接口信号后，立即封锁所有轴的控制信号，使所有轴立即停止。

7. 4. 2　PLC 控制实例

SINUMERIK 802Dsl 数控系统提供了 PLC 实例程序和子程序库，通过组织这些子程序，修改或添加机床实际应用所需的其他程序，就可设计成新的 PLC 应用程序了。例

如：33 号子程序（子程序名为 EMG_ STOP）是专门用于急停处理的子程序；44 号子程序（子程序名为 COOLING）是专门用来进行切削液控制的子程序；46 号子程序（子程序名为 TURRET1）是用于 4/6 刀位、霍尔开关检测的车床刀架的换刀控制的子程序。图 7-27 所示为切削液泵电气线路及开关输入和输出地址，图 7-28 所示为切削液泵控制梯形图。

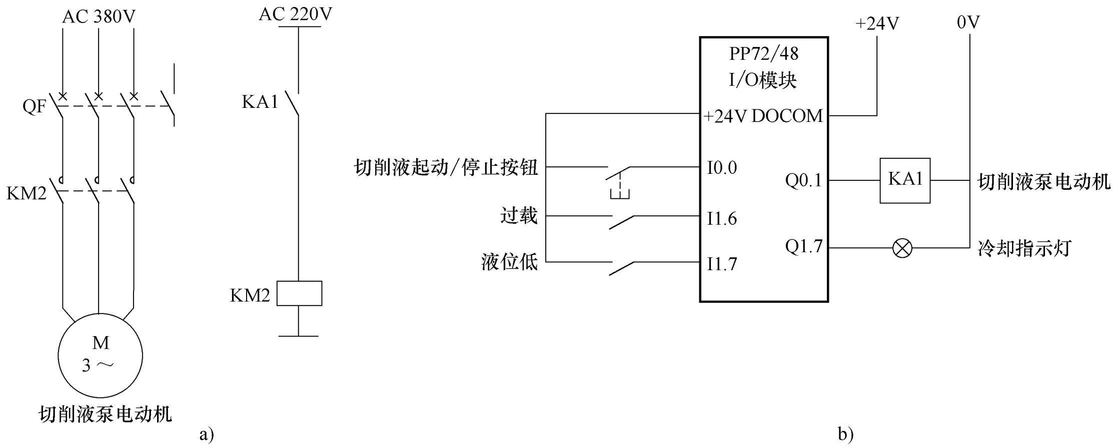


图 7-27　切削液泵电气线路及开关输入和输出地址

a）电气线路　b）外部开关输入/输出地址

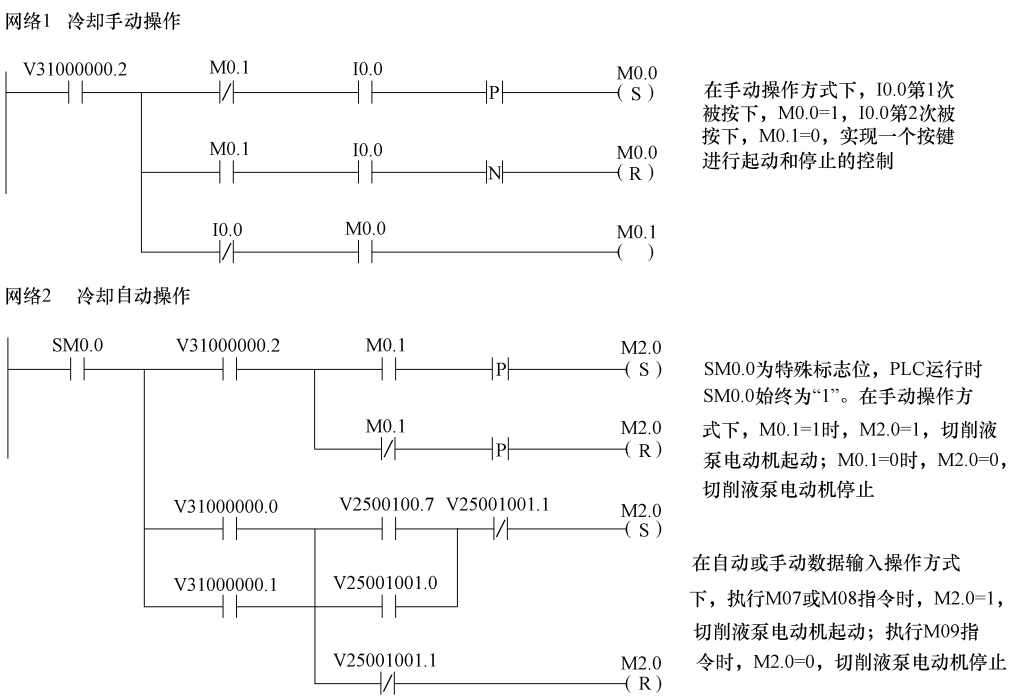


图 7-28　切削液泵控制梯形图

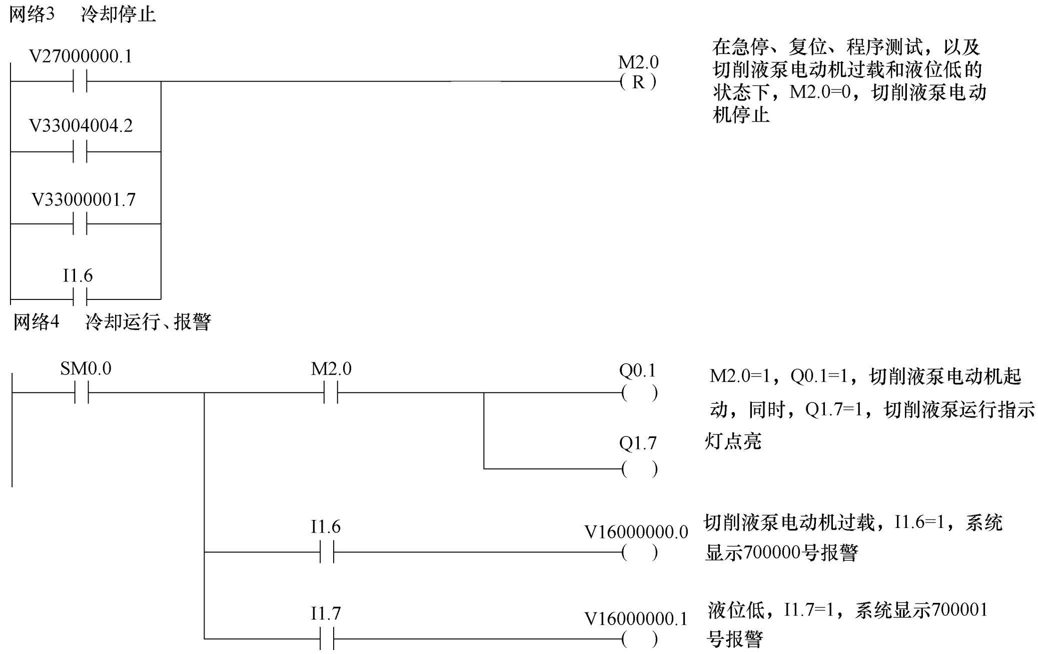


图 7-28　切削液泵控制梯形图（续）

程序中接口信号说明：

V31000000.2：CNC→PLC，手动操作方式（JOG）。

V31000000.0：CNC→PLC，自动操作方式（AUTO）。

V31000000.1：CNC→PLC，手动数据输入操作方式（MDA）。

V25001000.7：CNC→PLC，M07 译码信号。

V25001001.0：CNC→PLC，M08 译码信号。

V25001001.1：CNC→PLC，M09 译码信号。

V27000000.1：CNC→PLC，急停信号。

V33004004.2：CNC→PLC，复位信号。

V33000001.7：CNC→PLC，程序测试信号。

V16000000.0：PLC→CNC，CNC 调用 700000 号过载报警，并在系统屏幕上显示。

V16000000.1：PLC→CNC，CNC 调用 700001 号液位低报警，并在系统屏幕上显示。

思考题与习题

1. 填充题

（1）数控机床 PLC 主要用于__________和__________指令的控制。

（2）FANUC 系统 PMC 中，外部输入开关地址为______，外部输出开关地址为______；在 PMC 与 CNC 内部交换的信号中，CNC→PMC 的地址为______，PMC→CNC 的地址为______。

（3）SINUMERIK 802D/802Dsl 系统 PLC 中，外部输入开关地址为______，外部输出开

关地址为______；PLC 与 CNC 内部交换的信号地址为______。

（4）接近开关输出开关信号有__________和__________两种形式。

（5）PLC 晶体管输出地址若要驱动接触器，则该地址必须先外接____________。

（6）FANUC 系统串行主轴 PMC 控制中，主轴电动机正转和反转的信号分别是______和__________。

2. 简答题

（1）数控机床 PLC 控制包括哪些方面?

（2）模拟主轴和串行主轴 PMC 控制有什么区别?

（3）输入和输出开关地址在梯形图中分别是什么形式的?

（4）F 和 G 地址在 PMC 梯形图中分别是什么形式的?

3. 分析设计题

（1）某配置 FANUC 0iC 系统的数控机床，其硬限位保护控制如图 7-29 所示。

当 G114.0 和 G116.0 信号为“0”时，表示第 1 轴正向和负向禁止；限位开关为动断开关，当撞块压上正限位或负限位行程开关时，请分析 PMC 梯形图。

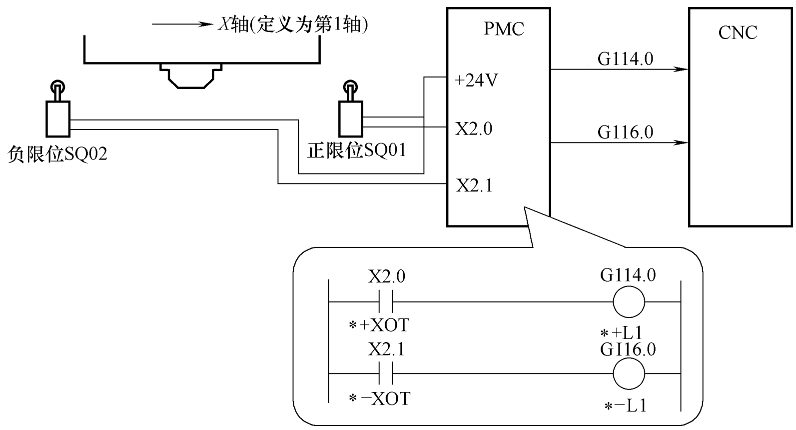


图 7-29　分析设计题（1）图

（2）配置 FANUC 0iC 系统的数控机床，其机床操作面板由机床制造厂家自行设计制造。面板上有一个切削液开关按键，用于手动切削液开和关，其 PMC 梯形图如图 7-30 所示。

地址说明：

X18.7：切削液开关按键。

X8.4：切削液泵电动机过载信号。

X9.5：切削液液位低信号。

Y8.3：切削液泵电动机起动信号。

Y15.6：切削液泵运行指示灯。

Y14.4：过载报警指示灯。

F1.1：CNC 复位信号。

虚线框内的梯形图是有关切削液按键的梯形图，分析该按键的控制逻辑。

（3）加工中心主轴箱上通常有一个松紧刀按钮，如图 7-31 所示。

参考第 1 章中关于松紧刀机构及其气动控制原理内容，以及切削液开关按键梯形图，设

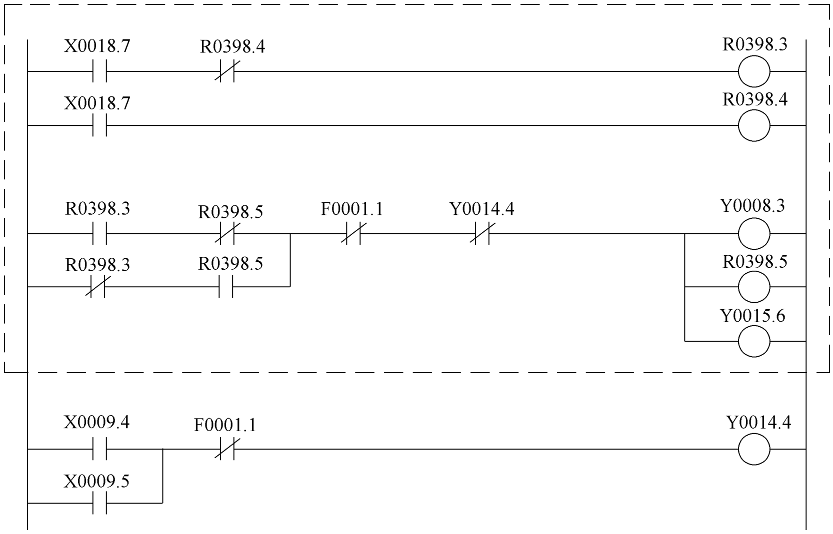


图 7-30　分析设计题（2）图

计在手动操作方式下，松紧刀的 PMC 梯形图。

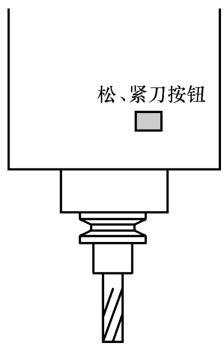


图 7-31　分析设计题（3）图



第 8 章

数控加工编程基础

8.1 加工程序编制的内容和方法

零件加工程序是控制机床运动的源程序。在数控机床上加工零件时，首先要将被加工零件的全部工艺过程以及辅助动作（主轴变速、换刀、切削液开关、夹紧或松开等）按运动顺序，用规定的指令代码和程序格式编写出一个加工程序清单，数控系统根据加工程序自动控制数控机床完成零件的全部加工过程。从零件图开始到获得加工程序的过程称为程序编制。

8.1.1 程序编制的内容和步骤

数控机床手工程序编制的内容和步骤一般包括：分析零件图样、确定加工工艺、数值计算、编写零件加工程序清单、将程序输入数控系统、校核加工程序和首件试切加工，如图 8-1 所示。

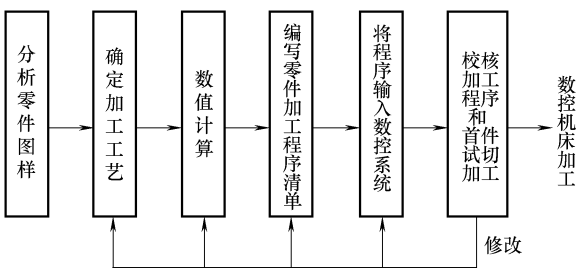


图 8-1 程序编制的一般步骤

1. 分析零件图样

通过零件图样对工件形状、尺寸、精度、材料、毛坯形状和热处理工艺进行分析，以便确定该零件是否适合在数控机床上加工，或适合在哪种类型的数控机床上加工。在数控机床确定后，明确加工的内容及要求，以便后续加工工艺的制订。

2. 确定加工工艺

（1）定位及工装夹具的选择　选择合适的定位基准，按照工序集中的原则，尽可能在一次装夹中完成所有工序。对单件和小批量的工件应选择标准化、模块化的夹具；对一些批量大或特殊形状的零件，可设计制造专门的工装夹具，以便提高装夹定位效率和精度。另

外，采用的工装夹具及装夹定位方法应便于安装、调整，且便于协调工件和机床坐标系之间的尺寸关系。

（2）正确选择编程原点和坐标系　编程原点及坐标系的选择原则包括：

1）所选的编程原点及坐标系应使程序编制简单。

2）编程原点、对刀点应选在容易找正，并在加工过程中便于检查的位置。

3）尽量将编程原点设置在工件的设计基准或工艺基准上，以便减小加工误差。

（3）选择合理的进给路线　进给路线的选择从以下几个方面考虑：

1）进给路线尽量短，减少空行程，提高加工效率。

2）合理选取起刀点及切入和切出方式，保证切入和切出过程平稳。

3）保证加工零件精度和表面粗糙度的要求。

4）保证加工过程的安全性，避免刀具与非加工面的干涉。

5）有利于简化数值计算，减少程序段数目和编制程序的工作量。

（4）选择合适的刀具　根据零件材料的性能、机床的加工能力及加工要求等因素来选择刀具。

（5）确定合理的切削用量　根据工件材料、刀具材料及粗、精加工，确定主轴转速、进给速度、背吃刀量及切削余量等。

3. 数值计算

数值计算的目的就是获得加工程序所需的刀位点数据。数值计算包括计算零件轮廓的基点和节点坐标。

（1）基点坐标的计算　一个零件的轮廓往往由许多不同的几何元素所组成，如直线、圆弧、二次曲线和特殊形状曲线等，各个几何元素间的连接点称为基点，如两直线间的交点、直线与圆弧或圆弧与圆弧间的交点或切点、圆弧与二次曲线间的交点或切点等，如图8-2a所示。对于简单零件轮廓，可根据零件几何尺寸和确定的工件坐标系，直接获得基点坐标；对于复杂零件轮廓，可通过零件几何尺寸和确定的工件坐标系找出几何元素间的三角函数关系获得基点坐标，也可以建立直线、圆弧和二次曲线方程，联立方程组求解基点坐标，还可以借助CAD软件获取零件轮廓的基点坐标。

（2）非圆曲线节点坐标的计算　当被加工零件的轮廓形状与机床插补功能不一致，如在只有直线和圆弧插补功能的数控机床上加工双曲线、抛物线等曲线时，就要采用逼近法加工，用直线或圆弧去逼近被加工曲线，逼近线段与被加工曲线的交点称为节点，如图8-2b、c所示。有关节点坐标的计算方法请参考有关资料。

（3）列表曲线的数学处理　被加工零件的轮廓还可以通过实验或测量的方法获得，这些通过实验或测量获得的数据在图样上以坐标点的表格形式给出，这种由列表点（又称为型值点）给出的轮廓曲线称为列表曲线。列表曲线数学处理的目的就是对列表曲线进行拟合，传统的方法有牛顿插值法、三次样条曲线拟合、圆弧样条拟合及双圆弧样条拟合等，目前应用更多的是计算机辅助几何设计中的各种建模方法，如Bezierr曲线、NURBS曲线等。

4. 编写零件加工程序清单

在完成上述工艺处理和数值计算后，根据计算出来的刀具运动轨迹坐标值和已确定的加工路线、刀具、切削用量以及辅助动作，依据数控系统规定的指令代码和程序段格式，编写零件加工程序清单。

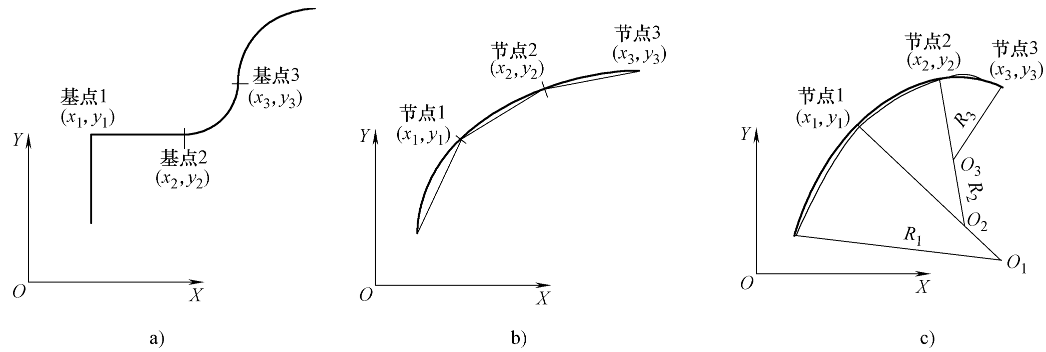


图 8-2　基点和节点

a）基点坐标　b）直线逼近非圆曲线　c）圆弧逼近非圆曲线

5. 将程序输入数控系统

程序清单编写完成后，要通过一定的方法将其输入到数控系统中，常用的输入方法有：

（1）手动数据输入　手动数据输入（MDI）就是根据程序清单的内容，操作数控系统键盘上的数字、字母和符号键将程序输入到数控系统中，同时，通过系统显示器实时进行检查、编辑和修改。手动数据输入适用于不太复杂的零件加工程序。

（2）通过存储介质输入　早期的数控系统使用穿孔纸带进行程序输入，即先用穿孔纸带记录加工程序，再通过纸带阅读机将纸带上的信息读入数控系统中。现代数控系统都采用存储卡进行程序输入，在计算机上编写好加工程序后先存储到存储卡中，再将存储卡插入数控系统的卡槽中，由系统读取加工程序。

（3）通过通信接口和网口输入　现代数控系统都有 RS232 串行通信接口和网络接口，计算机通过通信电缆或网线和一定的通信协议，将在计算机上编写好的加工程序传输到数控系统中。

6. 校核加工程序和首件试切加工

加工程序输入完成后，必须通过校核和首件试切削加工才能正式使用。校核一般是运行程序时将机床锁住，进行空运行检验，以检查程序指令和程序格式是否符合标准。在数控铣床上也可以用笔代替刀具，以纸代替工件进行画图模拟加工，以检验机床运动轨迹的准确性。通过首件试切削加工可进一步考察加工程序的准确性，通过测量检查工件是否达到加工精度，根据试切情况对装夹定位、刀具和切削用量以及程序进行修改，直到加工出满足要求的零件为止。另外，有些数控系统还可以在系统显示器上观察程序运行时刀具的运动轨迹，以此来判断程序的准确性。

8.1.2　程序编制的方法

1. 手工编程

手工编程是指从零件图样分析、工艺处理、数值计算、编写程序清单直至程序校验等各个步骤均由人工完成。手工编程广泛应用于点位加工、几何形状不太复杂的平面轮廓加工，这些零件坐标值计算较为简单、程序段不多且程序编制容易。由此，手工编程既经济又及时，且出错机会少。手工编程目前仍是广泛采用的编程方式，即使在自动编程高速发展的今

天，手工编程的重要地位仍不可取代。手工编程时，编程人员必须对所用机床及数控系统、程序指令代码和程序格式，以及加工工艺非常熟悉。

2. 自动编程

自动编程是指由计算机自动生成零件加工程序的过程。目前，自动编程大多采用图形交互式编程。图形交互式编程需要 CAD/CAM 软件支持，从工件的图形再现、刀具轨迹生成、加工过程的动态模拟，直到生成加工程序，都是通过屏幕菜单驱动实现的，具有形象直观、高效及容易掌握等优点。CAD/CAM 软件如 NX、Pro/E、SolidWorks、MasterCAM 及 CAXA 等都是性能完善的三维 CAD 造型和数控编程一体化软件，而且具有后置处理环境，可以面向众多的数控机床和大多数数控系统。

8.2　数控机床坐标系统

数控加工程序是建立在工件轮廓点坐标值基础上的，正确把握数控机床坐标轴的定义、运动方向的规定，以及根据不同坐标原点建立不同坐标系的方法，是获得坐标值的关键。

8.2.1　机床坐标系

为了确定工件在机床上的位置、机床运动部件的特殊位置（如换刀点、参考点）及运动范围（如行程范围、保护区域等），需要在机床上建立一个坐标系，该坐标系即为机床坐标系。机床坐标系的原点在机床的某个部位，是机床制造、安装和调整的基础。也是设置工件坐标系的基础。机床坐标系在出厂前已经调整好，不允许随意变动。

1. 机床坐标系及其确定原则

国际上已统一了数控机床的机床坐标系。机床坐标轴的命名遵循以下原则：

1）标准机床坐标系采用右手笛卡尔坐标系，如图 8-3 所示。

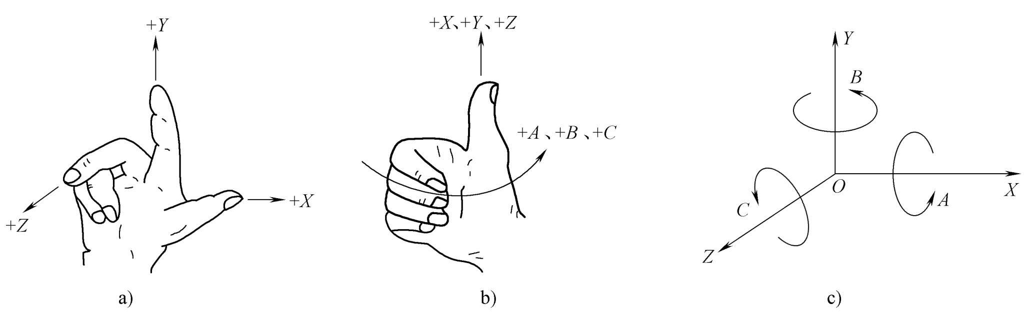


图 8-3　右手笛卡尔坐标系

a）直线轴坐标　b）回转轴坐标　c）坐标系

2）在标准机床坐标系中，假设工件固定不动，刀具相对工件运动，且刀具远离工件的方向为正方向。由于机床结构的不同，实际情况是，机床某个轴上刀具是静止的，而工件相对刀具是运动的，则该轴的实际正方向与标准坐标系规定的正方向相反。为了编程方便，规定工件固定，刀具相对于工件运动。

3）坐标轴命名顺序为，先 Z 后 X 再 Y。

2. 数控车床的机床坐标系

数控车床的机床坐标原点通常在主轴端面中心，有 X 和 Z 两个方向的进给运动。车床主轴轴线定义为 Z 轴，车刀沿 Z 轴离开工件的方向为正方向；直径方向定义为 X 轴，车刀沿 X 轴离开工件的方向为正方向。平床身和斜床身数控车床由于刀架安装位置不同，X 轴正方向也不同，如图 8-4 所示。

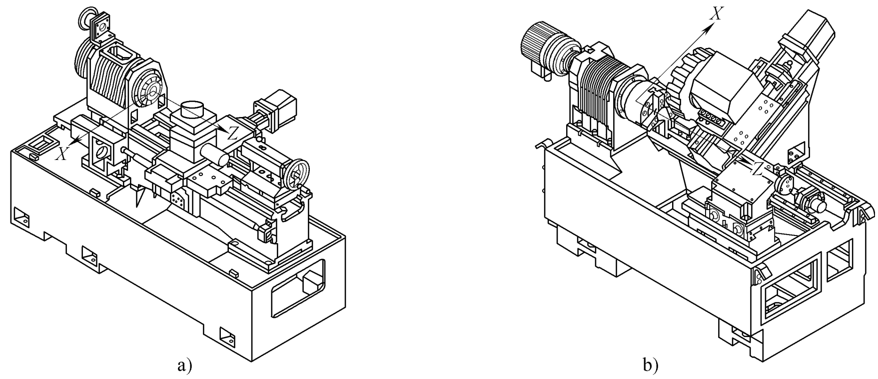


图 8-4　数控车床的机床坐标系

a）平床身（前置刀架）　b）斜床身（后置刀架）

3. 数控铣床和加工中心的机床坐标系

数控铣床及加工中心有 X、Y 和 Z 三个方向的直线进给运动，按立式和卧式两种机床结构，坐标轴的命名有所不同，如图 8-5 所示。

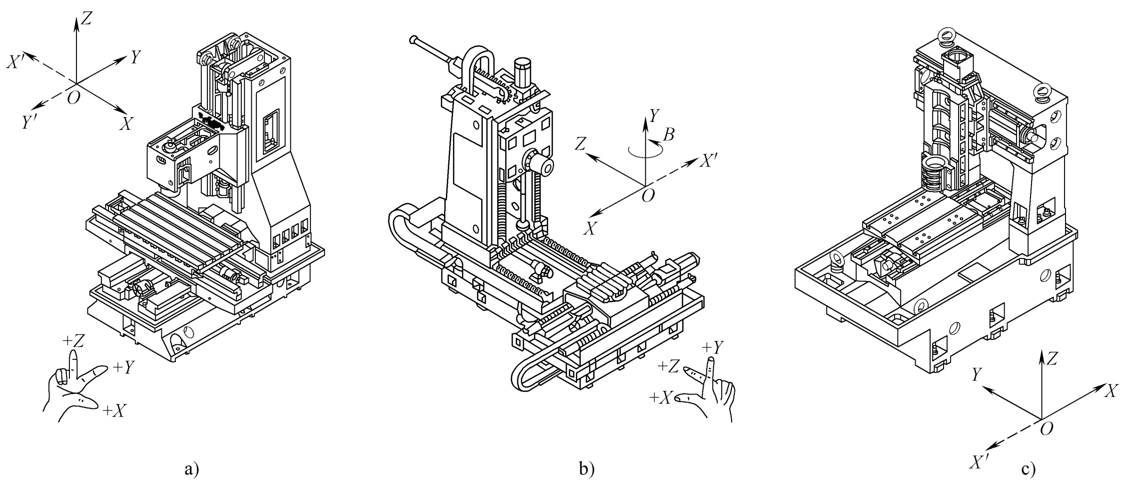


图 8-5　数控铣床及加工中心坐标系

a）立式　b）卧式　c）龙门式

（1）Z 轴　与主轴轴线平行的坐标轴为 Z 轴。图 8-5a 所示的立式铣床中，工件在 Z 方向静止，主轴箱沿立柱上下运动的轴为 Z 轴，且往上远离工件的方向为正方向；图 8-5b 所示的卧式铣床中，工件在 Z 向静止，主轴箱随立柱的纵向运动为 Z 轴，且往后远离工件方

向为正方向。

（2）*X* 轴　平行于工件装夹平面的坐标轴为 *X* 轴。对单立柱立式数控铣床和加工中心，人面对主轴，右侧为正方向，如图 8-5a 所示；对单立柱卧式数控铣床和加工中心，人面对主轴，左侧为正方向，如图 8-5b 所示；对双立柱机床（龙门式），从主轴向左立柱看，右侧为正方向，如图 8-5c 所示。对图 8-5a、b 和 c 所示的机床，工件在 *X* 方向是运动的，与标准坐标系的假设相反，则 *X* 轴实际上为坐标轴 *X′*，如图中虚线所示。

（3）*Y* 轴　根据 *Z* 轴和 *X* 轴的正方向，用右手笛卡尔定则可确定 *Y* 轴及其正方向，如图 8-5 所示。图 8-5a 中，工件在 *Y* 方向是运动的，与标准坐标系的假设相反，则 *Y* 轴实际上为坐标轴 *Y′*，如图中虚线所示。

（4）*A*、*B*、*C* 轴　在带数控回转工作台的数控铣床和加工中心中，根据回转中心线对应的直线轴名，用右手笛卡尔定则确定回转轴的名称及正方向。如图 8-5b 中，回转工作台轴线与 *Y* 轴平行，则回转台为 *B* 轴。

数控机床除了常规的数控车床、数控铣床和加工中心外，还有 5 轴联动加工中心、车铣复合加工中心等。5 轴联动加工是指一台机床上有 5 个坐标轴（3 个直线轴和 2 个旋转轴）在数控系统的控制下同时协调进行加工。图 8-6 所示为常见的 5 轴联动坐标轴配置形式。

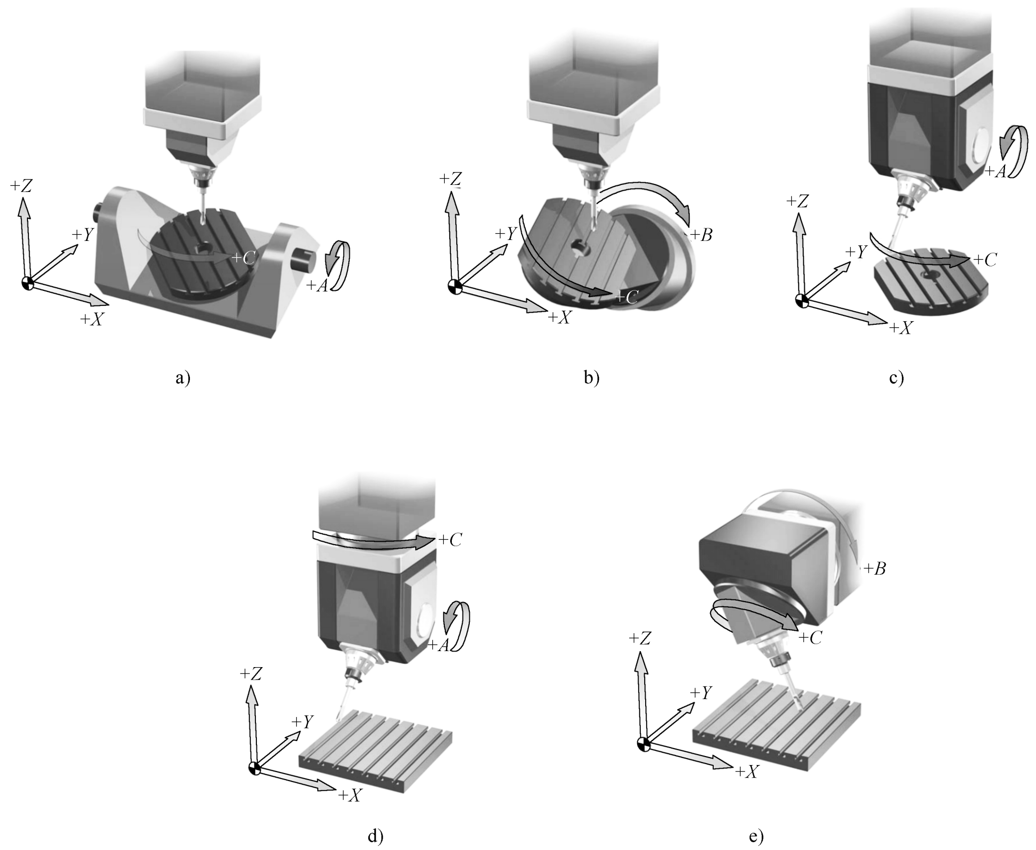
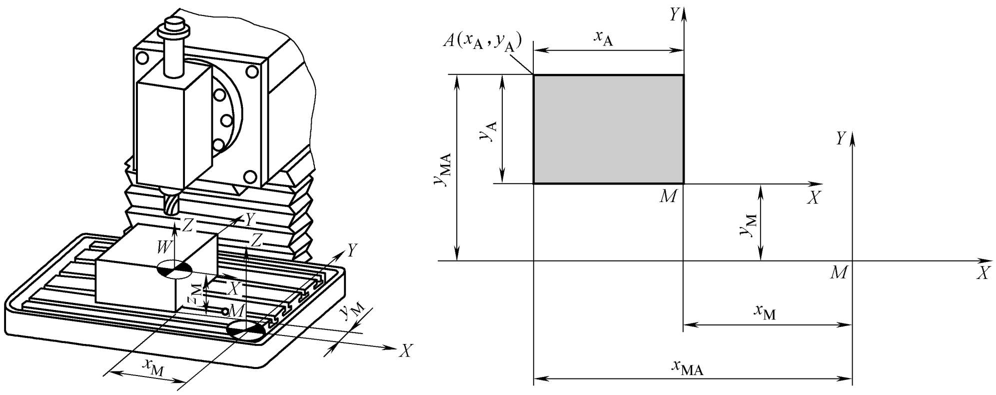


图 8-6　常见的 5 轴联动坐标轴配置形式

a）工件双摆动（摇篮式，*A* 轴和 *C* 轴）　b）工件双摆动（*B* 轴和 *C* 轴）　c）工件转动（*C* 轴）+主轴摆动（*A* 轴）
d）主轴双摆动（*A* 轴和 *C* 轴）　e）主轴双摆动（*B* 轴和 *C* 轴）

8.2.2 工件坐标系

加工程序中的坐标值是在工件坐标系中获得的。编程人员以工件图样上的某一点为原点建立坐标系，该坐标系即为工件坐标系。工件坐标系的原点可由编程人员确定，原则上设定在工件的设计基准或工艺基准上，或者在夹具的某一固定点上；坐标轴的名称和方向应与标准机床坐标系一致，如图 8-7 所示。



a)　　b)

图 8-7　工件坐标系与机床坐标系

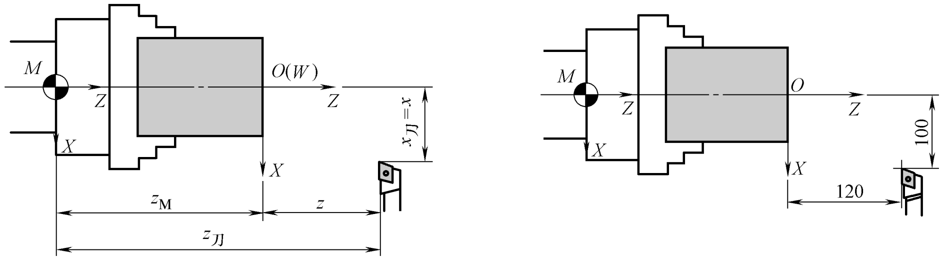
a）工件坐标系原点偏置　b）工件坐标系与机床坐标系的关系

M—机床坐标系原点　*W*—工件坐标系原点

工件坐标系原点与机床坐标系原点之间的距离称为工件原点偏置，如图中的 x_M、y_M 和 z_M，该偏置值在加工之前经测量先预存到数控系统中，加工时工件原点偏置值和工件坐标系中的坐标值自动加到机床坐标系中，使各轴准确地在机床坐标系中运动。例如：在工件坐标系中，工件上 *A* 点坐标为 x_A 和 y_A，根据工件坐标系原点偏置 x_M 和 y_M，系统自动计算出 *A* 点在机床坐标系中的坐标值，即 $x_{MA}=x_M+x_A$，$y_{MA}=y_M+y_A$。因此，编程人员可以不考虑工件在机床上的安装位置，直接按图样上的工件坐标系进行编程。

1. G50 指令及试切对刀和设定工件坐标系

（1）G50 指令　该指令的功能是规定刀具起刀点距工件坐标系原点的距离，如图 8-8a 所示。



a)　　b)

图 8-8　数控车床工件坐标系设定指令 G50

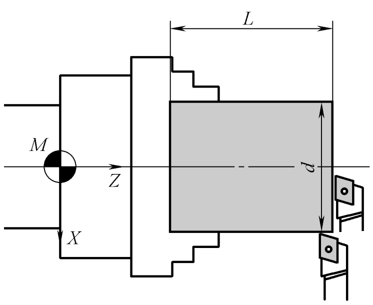
a）坐标关系　b）应用图例

以数控车床为例，指令格式为

G50 X(x)　Z(z)；

坐标值 x、z 为车刀刀位点在工件坐标系中的起始点位置。当刀具处于某个位置时，刀位点在机床坐标系中的坐标值 $x_{刀}$、$z_{刀}$ 存储在数控系统的刀具位置寄存器中。若要设定工件坐标系原点在工件右端面中心，测得刀位点与工件右端面中心之间的坐标值 x、z，则数控系统通过 G50 指令自动测量出工件坐标系原点与机床坐标系原点之间的坐标值，即 $x_M=x_{刀}-x$，$z_M=z_{刀}-z$。例如：图 8-8b 中，以工件右端面中心作为工件坐标系原点，刀尖的起始点距工件原点的 X 方向尺寸为 200mm（直径值），Z 方向尺寸为 120mm，执行下面程序段“G50 X200 Z120；”，数控系统就会根据当前刀尖在机床坐标中的坐标值，以及 x 值 200mm 和 z 值 120mm 自动建立一个以工件右端面中心为坐标原点的工件坐标系。显然，如果 x、z 坐标值不同，或者坐标值相同但改变了刀位点在工件坐标系中的位置，所设定的工件坐标系的原点也就不同，因此，在执行“G50 X(x)　Z(z)；”前，刀具就应该位于一个确定位置，这一过程就是对刀过程。执行 G50 指令时，机床不动，刀具是静止的。

（2）试切对刀　常用的手动对刀操作是试切对刀，通过手动切削一小部分工件并配合系统设定画面，直接以刀具当前位置建立工件坐标系而不用 G50 指令，如图 8-9a 所示。



a)

刀具补正/几何　　O0000　N00000

番号	X	Z	R	T
01	0.000	0.000	0.000	0
02	0.000	0.000	0.000	0
03	0.000	0.000	0.000	0
04	0.000	0.000	0.000	0
05	0.000	0.000	0.000	0
06	0.000	0.000	0.000	0
07	0.000	0.000	0.000	0
08	0.000	0.000	0.000	0

现在位置(相对坐标)

U　−100.000　　W　−100.000

>

JOG ****　***　***

[No 检索] [　测量　] [C输入] [+输入] [　输入]

b)

图 8-9　试切对刀过程

a）X 方向和 Z 方向对刀　b）FANUC 系统“刀具补正/几何”画面

以 FANUC 系统为例，工件坐标系原点要设定在工件右端面中心。工件和刀具装夹完成后，先车削一小段外圆并用卡尺测量出外径尺寸，在系统“刀具补正/几何”画面（图8-9b）中，在 X 栏中输入测量得到的直径值 d，按［测量］软键，数控系统自动存储工件轴线在机床坐标系中 X 方向的位置；再切削工件右端面，保持 Z 轴不动，在系统“刀具补正/几何”画面中，在 Z 栏中输入“0”，按［测量］软键，数控系统自动存储工件右端面在机床坐标系中 Z 方向的位置。至此，工件坐标系原点在工件右端面中心设定完成。由此，相当于执行了程序段“G50 X（d）Z0；”。若测量出工件长度 L，并输入到 Z 栏中，则工件坐标系设定在工件左端面中心。

因为每把刀具的形状、尺寸及在刀架上的安装位置不同，所以在加工之前要将所用到的刀具全部进行对刀。另外，更换刀具也要重新对刀。

（3）自动对刀　为提高加工效率和对刀的自动化程度，有些数控车床可选装机内对刀

仪进行自动对刀，如图 8-10 所示。

对刀块安装在摆杆上，对刀时，摆杆转到对刀位置，对刀块的测量基准与机床原点有严格的尺寸关系，如图中的 X_M 和 Z_M。对刀时，先车削工件外径和端面作为对刀基准面，在对刀程序的控制下，刀具分别沿 X 轴和 Z 轴向对刀块移动，当被测车刀刀尖触碰到对刀块时，对刀块发出信号，数控系统根据测量得到的 ΔX 和 ΔZ 偏移量，自动完成工件坐标系的设定。机内对刀仪还可以对刀具磨损量进行测量并自动进行补偿。

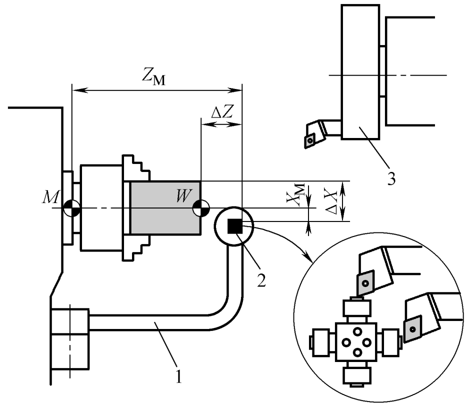
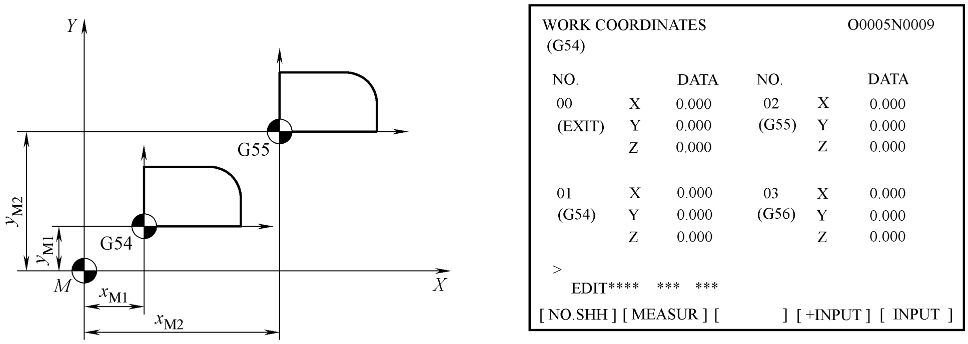


图 8-10　机内对刀仪

1—摆杆　2—对刀块　3—转塔刀架

2. G54~G59 编程原点偏置指令

将机床坐标系原点与要设定的工件坐标系原点间的偏置值用手动数据输入方式输入到数控系统中，然后用 G54~G59 中任一指令调用，如图 8-11 所示。



a)　　b)

图 8-11　G54~G59 指令设定工件坐标系

a）工件坐标系偏置　b）FANUC 系统工件坐标系设定画面

例如：同一个工件坐标系原点因在机床坐标系中的位置不同，每个位置的工件坐标系原点用 G54~G59 来表示。在工件坐标系设定画面中，G54 对应的 X、Y、Z 栏中设定的值为 x_{M1}、y_{M1}、z_{M1}；G55 对应的 X、Y、Z 栏中设定的值为 x_{M2}、y_{M2}、z_{M2}。G54~G59 偏置值一经设定，工件坐标系原点在机床坐标系中的位置就不变，它与刀具当前位置无关。

（1）数控铣床/加工中心 X、Y 方向对刀　为了获得工件坐标系原点的偏置值，数控铣床和加工中心除了试切对刀方法外，还可以借助对刀工具进行对刀，如寻边器等。图 8-12 所示为寻边器及对刀示意图。

光电寻边器安装在主轴中，主轴不转，移动主轴或工作台，当寻边器球测头触碰到工件时，LED 会发光，表示寻边完成；偏心式寻边器安装在主轴中，主轴按一定的转速旋转，当偏心测头触碰到工件时，偏心测头径向移动，且偏心测头轴线与柄部轴线同轴时，表示寻边完成。图 8-12c 所示的工件坐标系原点设定在定位孔中心，对刀过程中，寻边器分别在 X 方向和 Y 方向触碰到孔表面，通过系统机床坐标系画面，记录下对应的机床坐标值 x_1、x_2

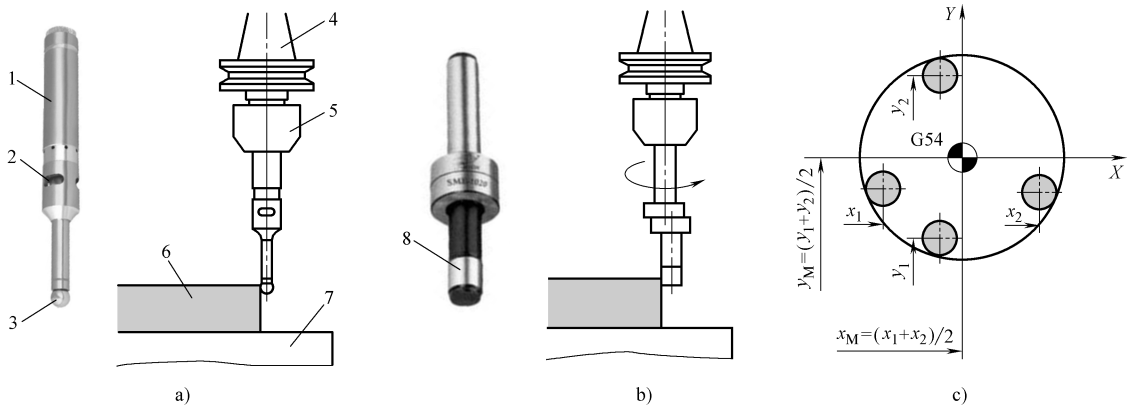


图 8-12　寻边器及对刀示意图

a）光电式寻边器　b）偏心式寻边器　c）定位孔对刀

1—柄部　2—LED　3—球测头　4—刀柄　5—夹头　6—工件　7—工作台　8—偏心测头

及 y_1、y_2，则定位孔中心在机床坐标系中的坐标值为 $x_M=(x_1+x_2)/2$，$y_M=(y_1+y_2)/2$。为方便起见，有些数控铣床可以用安装在主轴中的立铣刀直接进行对刀。

（2）数控铣床/加工中心 Z 方向对刀　图 8-13 所示为 Z 轴对刀仪及对刀示意图。

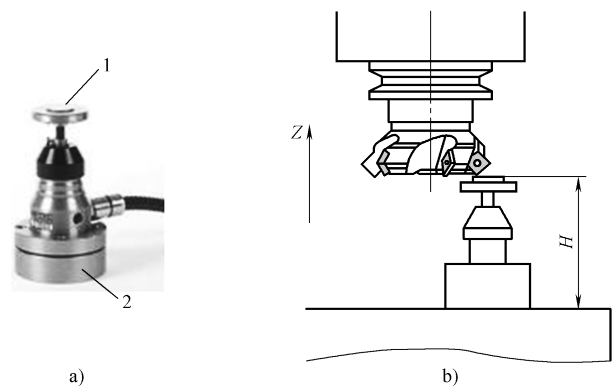


图 8-13　Z 轴对刀仪及对刀示意图

a）对刀仪　b）对刀

1—感应块　2—底座

Z 轴对刀仪安装在工作台某个固定位置，在对刀程序的控制下，当刀具在 Z 方向触碰到对刀仪上的感应块时，即产生触发信号，Z 轴对刀仪通过电缆、红外线或无线电将触发信号传送给数控系统，数控系统通过内部的测量程序自动设定工件坐标系 Z 轴坐标原点。Z 轴对刀仪还可以通过刀具磨损前后的对刀，测量出刀具轴向磨损量，由数控系统进行长度方向的补偿。

有些加工中心配置有自动测量仪，对刀时，机械手将测量仪从刀库中取出并装入主轴，在系统对刀程序的控制下，测量仪测头触碰零件表面并发出红外信号或无线电信号给接收器，接收器再将信号传送给数控系统，数控系统记录当时的机床坐标值，计算出工件坐标系

原点在机床坐标系中的坐标值，并存储到系统坐标寄存器中。测量仪除了对刀外，还可以在线对加工后的工件进行测量，数控系统根据测量值对加工误差进行补偿。

思考题与习题

1. 简答题

（1）机床坐标轴命名遵循什么原则？

（2）机床坐标系与工件坐标系之间有何关系？

（3）工件坐标系有哪些设定方法？

（4）数控编程数值计算包括哪些内容？

2. 分析计算题

（1）图 8-14 所示为某卧式加工中心的结构组成，分析各轴的运动状况，并在图中标出标准机床坐标轴和机床实际坐标轴。

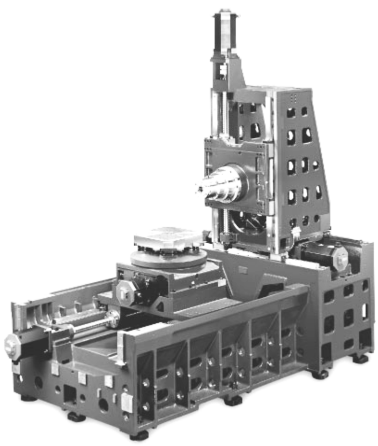


图 8-14　分析计算题（1）图

（2）图 8-15 所示为用 ϕ8mm 铣刀进行对刀的示意图，表 8-1 所列为对刀时机床坐标系下各点的坐标值。试计算机床坐标系下工件原点 G54 的坐标值。

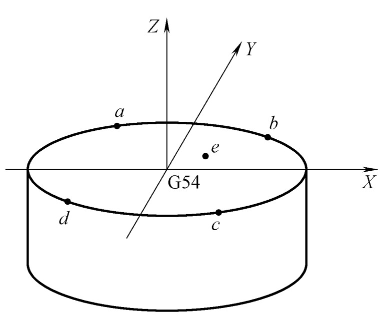


图 8-15　分析计算题（2）图

表 8-1　分析计算题（2）表

	a（外侧）	b（外侧）	c（外侧）	d（外侧）	e（上表面）
X	-267.321	-233.914	-233.914	-267.321	-248.707
Y	-143.472	-143.472	-122.462	-122.462	-132.048
Z	-48.644	-39.746	-42.506	-44.733	-36.481

（3）零件图和工件坐标系如图 8-16 所示。工件坐标系原点 G54 设定在工件 *A* 点，请根据零件图尺寸，计算 *B*、*C*、*D*、*E*、*F*、*G* 及圆心 O_1、O_2 和 O_3 的 *X*、*Y* 坐标值（不考虑 *Z* 坐标）。

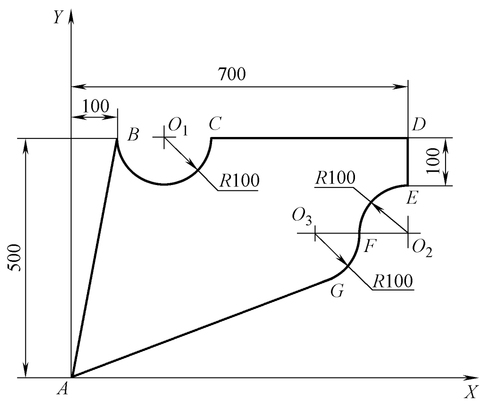
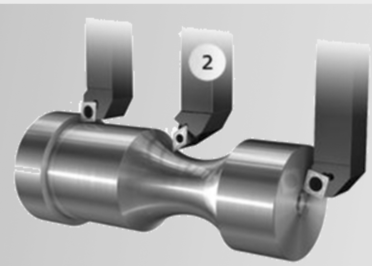


图 8-16　分析计算题（3）图

第 9 章



数控车床加工程序

9.1 数控车削基本指令

数控车床在加工时，工件装夹在主轴中并随主轴一起旋转，刀架在 X 轴和 Z 轴组成的平面内运动，完成轴类或盘套类零件的端面、外圆、内孔及螺纹的车削加工。由于数控车床配置的数控系统不同，使用的指令在定义和功能上有一定的差异，但其基本功能和编程方法还是相同的。本书涉及的数控指令及程序以 FANUC 系统为依据，其他如 SIEMENS 系统的指令和程序可参考有关资料。

9.1.1 辅助功能 M 指令

1. 主轴控制指令

M03：主轴正转，从主轴轴端方向看，逆时针方向为主轴正转。

M04：主轴反转，从主轴轴端方向看，顺时针方向为主轴反转。

M05：主轴停止。

M03、M04 通常与主轴转速 S 指令配合使用，如 M03 S600 表示主轴正转，转速为 600r/min。

2. 切削液开、关指令

M08：切削液开。

M09：切削液关。

3. 程序结束指令

M02：程序结束指令，执行该指令后，表示程序内所有指令均已执行完成，关闭机床所有动作，机床复位。但程序结束后，不返回到程序开头的位置。

M30：程序结束指令。与 M02 的区别是，程序结束后返回到开头位置。

9.1.2 准备功能指令

1. 公制/英制尺寸指令

G20：英制尺寸指令。

G21：公制尺寸指令。

公制/英制转换关系为：1in = 25.4mm。数控系统开机后默认为 G21 状态。

2. 进给速度方式指令

G98：每分钟进给指令，单位为 mm/min，如图 9-1a 所示。

G99：每转进给指令，单位为 mm/r，如图 9-1b 所示。

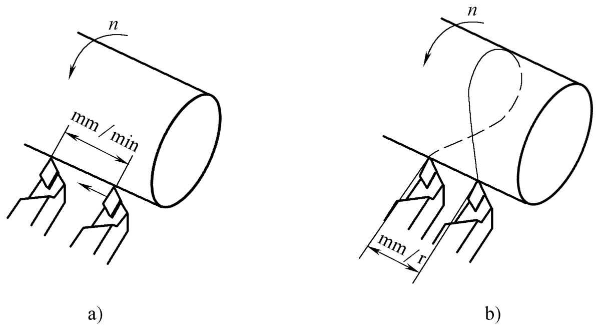


图 9-1 进给速度方式

a）每转进给 b）每分钟进给

数控车床进给速度通常用每转进给的方式，进给速度的数值是根据工件材料、刀具材料及切削条件等因素确定的。

3. 主轴转速控制指令

G96：恒线速切削指令。在采用常规的主轴转速（r/min）进行圆锥或端面切削时，由于受工件半径变化的影响，刀具切削点的线速度是变化的，从而影响工件表面的加工质量，如图 9-2 所示。

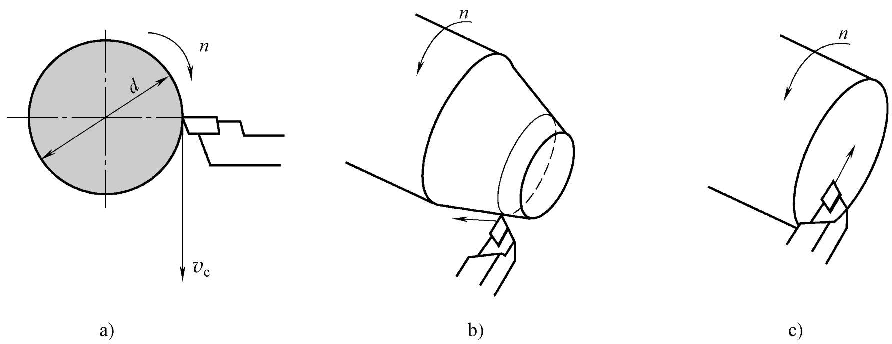


图 9-2 恒线速切削

a）转速与线速度 b）锥面切削 c）端面切削

系统执行 G96 指令后，用 S 指令指定主轴切削速度。例如：执行 G96 S150，表示切削点的线速度保持在 150m/min。

G97：取消恒线速控制指令，恢复每分钟转速的功能。数控系统开机后默认为 G97 状态。

4. 刀具功能 T 代码

T 代码用于换刀，由刀具号和刀具补偿号组成，刀具号与补偿号通常用相同的数字，便于管理和识别，即

T×× ××

- ××（后两位）——刀具补偿号
- T××（前两位）——刀具号

刀具号与刀架上的刀座编号对应，刀具补偿号是系统中刀具寄存器中的地址，在该寄存器中，保存有车刀的位置偏置值、刀尖圆弧半径及磨损量等参数。例如：执行 T0101 指令后，刀架转动，将 01 号刀具转到加工位置；同时，与 01 号刀具对应的 01 号偏置值和补偿等数据生效。

9.1.3 刀具运动指令

1. 快速定位指令 G00

该指令的功能是：刀具从当前（起始）位置快速移动到下一个目标（终点）位置，刀具在移动过程中不进行切削，如图 9-3 所示。

刀具快速移动的速度是由 X 轴和 Z 轴两轴快速移动速度合成的，如 FANUC 0i 系统 1420 号参数中分别设定 X 轴和 Z 轴的快速运动速度。快速运动速度可以通过机床操作面板上的倍率开关进行调整。

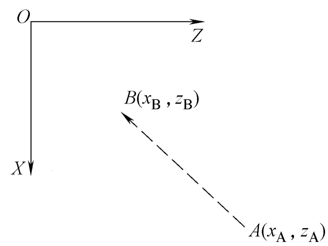


图 9-3　G00 指令

图 9-3 中，起点 A 坐标为（x_A，z_A），终点 B 坐标为（x_B，z_B），x 值均为直径值，虚线表示刀具快速移动的轨迹，箭头表示移动方向。G00 格式为：

绝对值编程：

N×× G00 X__ Z__ ;

- ;——程序段结束符
- Z 后数值——Z 轴终点坐标（Z = z_B）
- Z——Z 轴绝对值字
- X 后数值——终点直径值（X = x_B）
- X——X 轴绝对值字
- N××——程序段号（可省略）

增量值编程：

N×× G00 U__ W__;

- W 后数值——终点 Z 相对起点 Z 的增量值（W = $z_B - z_A$）
- W——Z 轴增量值字
- U 后数值——终点直径相对起点直径的增量值（U = $x_B - x_A$）
- U——X 轴增量值字

【例 9-1】 图 9-4 中，刀具从 A 点快移到 B 点。

绝对值编程：G00 X30.0 Z2.0；

增量值编程：G00 U-70.0 W-48.0；

说明：

1）G00 指令为模态量，可由 G01、G02、G03 指令注销。

2）FANUC 系统中，坐标值用小数点编程，表示以 mm 为单位，如 X30.0 表示为 30mm；若为 X30，则表示为 30μm。小数点编程时，小数点后面的零可省略，如 X30.0 与 X30. 是等效的。

3）绝对值和增量值可混合编程，如 G00 X30.0 W-48.0 或 G00 U-70.0 Z2.0。

2. 直线插补指令 G01

该指令的功能是：刀具以直线轨迹进行切削加工，进给速度由 F 指令指定，进给速度可由机床操作面板上的倍率开关进行调整。以图 9-5 为例，直线插补轨迹用实线表示，箭头表示切削方向，G01 的指令格式为：

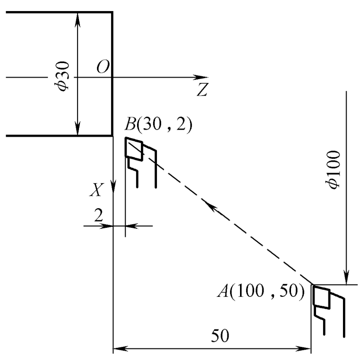


图 9-4　G00 指令应用举例

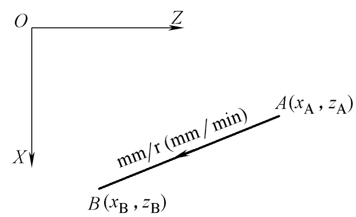


图 9-5　G01 指令

绝对值编程：

N ×× G00 X __ Z __ F __；

G98 指令指定时，F 值单位为 mm/min

G99 指令指定时，F 值单位为 mm/r

进给速度字

增量值编程：

N×× G00 U __ W __ F __；

G01 指令为模态量，可由 G00、G02、G03 指令注销，F 指令也为模态量，由不同的进给速度进行注销。

【例 9-2】 图 9-6 中，刀具起点在 *B* 点，切削轨迹为：*B*→*C*→*D*→*E*→*F*，进给速度为 0.1mm/r。各点坐标值为：*B*(30，2)，*C*(30，-30)，*D*(45，-40)，*E*(45，-70)，*F*(50，-70)。

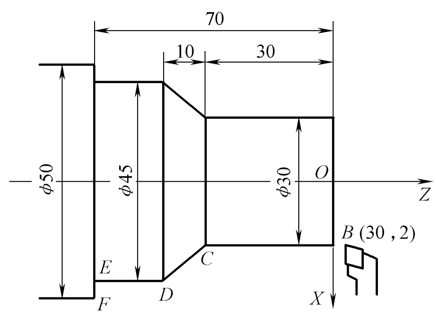


图 9-6　G01 指令应用举例

绝对值编程：

N10 G01 X30.0 Z-30.0 F0.1；*B*→*C*

N20 [G01] X45.0 Z-40.0 [F0.1]；*C*→*D*

N30 [G01] [X45.0] Z-70.0 [F0.1]；*D*→*E*

N40 [G01] X50.0 [Z-70.0] [F0.1]；*E*→*F*

程序中，[ ]中的指令、坐标值和进给速度因为是模态量，故可省略。上述切削过程请读者用增量值方式编写程序。

3. 圆弧插补指令

G02：顺时针圆弧插补指令。

G03：逆时针圆弧插补指令。

G02、G03 指令为模态量，可由 G00 或 G01 指令注销。

该指令的功能是，刀具沿圆弧轨迹进行切削加工，进给速度由 F 指令指定，进给速度可由机床操作面板上的倍率开关进行调整。根据数控车床配置的是前置刀架还是后置刀架，G02 和 G03 的定义不同，如图 9-7 所示。

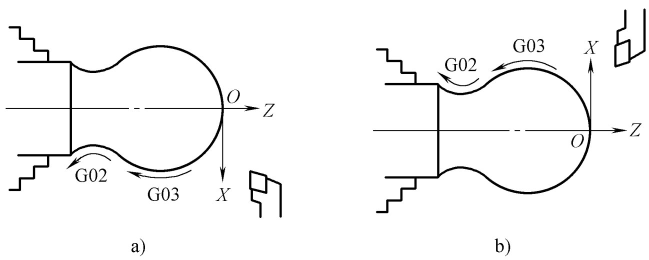


图 9-7　G02、G03 的判断

a）前置刀架　b）后置刀架

以图 9-8 为例，圆弧插补轨迹用实线表示，箭头表示切削方向，以此判断该圆弧是 G02 还是 G03。

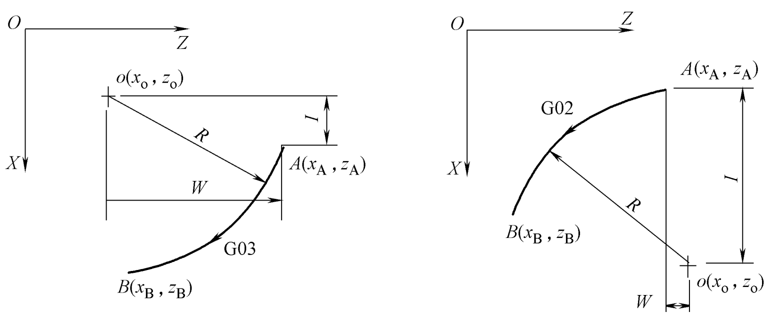


图 9-8　G02、G03 指令

G02、G03 指令涉及圆弧半径及圆心，其指令格式有两种表达方式：

1）已知半径 *R* 的指令格式：

N ×× $\begin{Bmatrix} G02 \\ G03 \end{Bmatrix}$ X(U)__ Z(W) __ R__ F__;

- R：圆弧半径
- X(U)、Z(W)：绝对值编程时，X、Z 为圆弧终点；增量值编程时，U、W 为圆弧终点相对起点的增量值

2）已知圆心坐标的指令格式：

N ×× $\begin{Bmatrix} G02 \\ G03 \end{Bmatrix}$ X(U) __Z(W) __I __K __F__;

- K：圆心相对圆弧起点 Z 坐标的增量值（$K = z_o - z_A$）
- K：Z 轴辅助轴
- I：圆心相对圆弧起点 X 坐标的增量值（$I = x_o - x_A$）
- I：X 轴辅助轴

【例 9-3】 图 9-9 中，刀具起点在 A 点，圆弧切削至 B 点，进给速度为 0.1mm/r。

绝对值及半径编程：

G02 X50.0 Z-20.0 R25.0 F0.1;

绝对值及圆心编程：

G02 X50.0 Z-20.0 I50.0 K0 F0.1;

9.1.4　刀尖圆弧半径补偿

1. 刀尖圆弧半径补偿的目的

车刀在实际切削加工中，为了提高刀尖强度，降低工件加工表面粗糙度值，通常在车刀刀尖处有一圆弧过渡刃，且有一定的半径值，车刀的刀位点为刀尖圆弧的圆心，如图 9-10 所示。

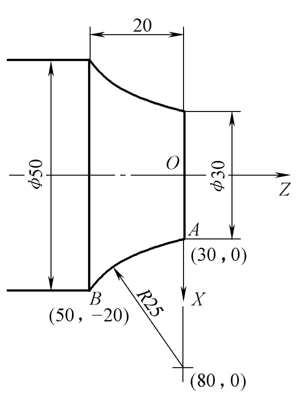


图 9-9　G02、G03 指令应用举例

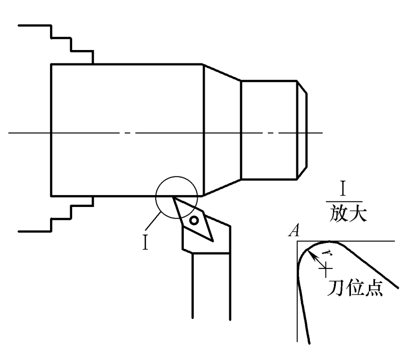


图 9-10　车刀刀尖圆弧和刀位点

车削加工程序是根据刀具上的理想刀尖点，按工件轮廓尺寸进行编制的，如图 9-10 中的 *A* 点，实际加工出来的工件在圆锥或圆弧处会产生欠切或过切的现象，造成工件轮廓误差，如图 9-11a 所示。

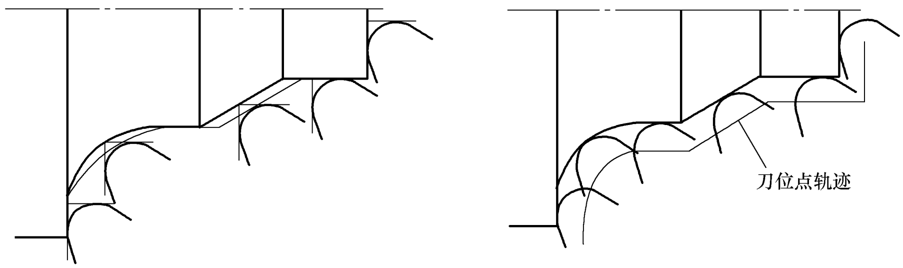


图 9-11　刀尖圆弧半径补偿

a）补偿前　b）补偿后

数控系统应用刀尖圆弧半径补偿功能可以克服这一现象，就是根据零件轮廓、刀尖圆弧半径值以及加工方向，自动计算出刀位点的运动轨迹，使刀位点轨迹与编程轮廓相距一个刀尖圆弧半径偏移量，从而使加工好的零件符合形状和尺寸要求，如图 9-11b 所示。车削端面、圆柱面时，刀尖圆弧半径不产生轮廓误差，可不用刀尖圆弧半径补偿；但在车削圆锥面、凸圆环或凹圆环时应采用刀尖圆弧半径补偿。

2. 刀尖圆弧半径补偿指令

如图 9-12 所示，刀尖圆弧半径补偿有左补偿和右补偿两种类型。

G41：左补偿。沿加工方向看，刀具位于工件左侧。

G42：右补偿。沿加工方向看，刀具位于工件右侧。

G40：刀尖圆弧半径补偿撤销。

刀尖圆弧半径补偿的建立和撤销必须在 G01 或 G00 指令中进行，如图 9-13 所示。

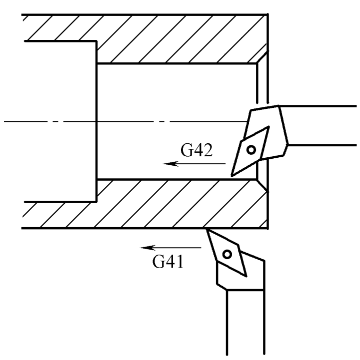


图 9-12　刀尖圆弧半径补偿 G41 和 G42 指令

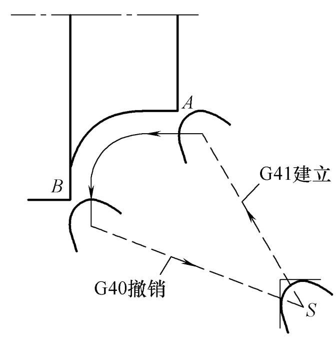


图 9-13　刀尖圆弧半径补偿的建立与撤销

指令格式为：

$$\begin{Bmatrix}G41\\G42\\G40\end{Bmatrix}\left\{\begin{matrix}G00\\G01\end{matrix}\right.\ X__\ Z__\ (F__);$$

（X__ Z__：刀尖圆弧半径补偿建立或撤销终点坐标）

刀具从起点 *S* 到工件轮廓 *A* 点的过程为刀尖圆弧半径补偿建立的过程，根据加工方向，建立半径左补偿；从轮廓 *A* 到 *B* 是切削过程；从 *B* 到 *S* 是刀尖圆弧半径补偿撤销的过程。

【例 9-4】 零件如图 9-14 所示，用带刀尖圆弧的精车刀车削端面和外圆柱面。*S* 为加工起点，*E* 为终点。

程序为：

O0901；	程序名
T0101；	换 01 刀，调用 01 刀具寄存器中的偏置值建立工件坐标系，以及刀尖半径设定值
M03 S1000；	主轴正转，转速为 1000r/min
G00 X0 Z10.0；	刀具定位 *S* 点
G01 G41 Z0 F0.1；	刀具移动到工件端面中心并建立左补偿，进给速度为 0.1mm/r
X40.0；	车 ϕ40mm 端面
Z-18.0；	车 ϕ40mm 外圆
X80.0；	车 ϕ80mm 台阶
G00 G40 X85.0 Z10.0；	撤销刀尖圆弧半径补偿，并返回到 *E* 点
M30；	程序结束，主轴及进给停止

9.1.5　基本指令编程实例

图 9-15 所示零件，毛坯为 ϕ30mm 棒料，用外圆及端面车刀加工至规定尺寸。车削顺序为：车端面→车外圆到 ϕ28mm→分两次车外圆到 ϕ18mm 和 *R*5mm（第 1 次背吃刀量为 3mm，第 2 次背吃刀量为 2mm）。主轴转速为 600r/min，进给速度为 0.3mm/r。

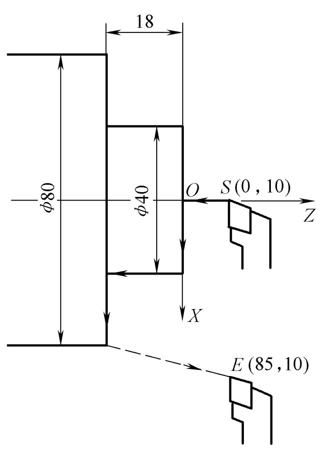


图 9-14　刀尖圆弧半径补偿指令应用举例

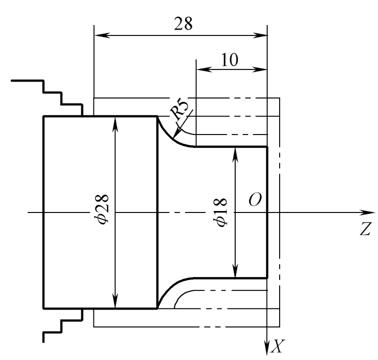


图 9-15　车削基本指令应用实例

程序为：

O0902；	程序名
G97 G40 G21；	系统初始设定

T0202；	换 02 号刀具，调用 02 刀具寄存器中的偏置值建立工件坐标系
M03 S600；	主轴正转，转速为 600r/min
M08；	切削液开
G00 X35.0 Z0；	刀具定位，准备车右端面
G01 X-1.0 F0.3；	车端面，进给速度为 0.3mm/r
G00 Z2.0；	刀具 *Z* 方向退刀
X28.0；	刀具定位，准备车 ϕ28mm 外圆
G01 Z-28.0 F0.3；	车 ϕ28mm 外圆
U5.0；	刀具 *X* 方向退刀至 ϕ33mm 处
G00 Z2.0；	
X22.0；	刀具定位，准备第 1 次切深，背吃刀量为 3mm
G01 Z-10.0 F0.3；	第 1 次车 ϕ18mm 外圆
G02 X28.0 Z-13.0 R3.0；	第 1 次车 *R*5mm 圆弧
G00 Z2.0；	
X18.0；	刀具定位，准备第 2 次切深，背吃刀量为 2mm
G01 Z-10.0 F0.3；	第 2 次车 ϕ18mm 外圆至规定尺寸
G02 X28.0 Z-15.0 R5.0；	第 2 次车 *R*5mm 圆弧至规定尺寸
G00 U2.0；	刀具 *X* 方向退刀至 ϕ30mm 处
X100.0 Z80.0；	快移至对刀点
M30；	程序结束，主轴及进给停止，切削液关

9.2 车削固定循环

数控车床加工的毛坯有棒料和铸锻件，从粗加工到精加工，切削余量大，需要多次切削才能切除全部余量。为了简化编程，数控系统提供了不同形式的固定循环指令，以缩短程序长度，减小程序所占内存。车削固定循环就是用一个指令及加工参数完成一个加工过程，有单一形状固定循环、复合形状固定循环、切槽循环及螺纹切削等，分别用于不同形状和不同类型毛坯的零件加工，只需一个指令就可完成多次重复的切削加工。

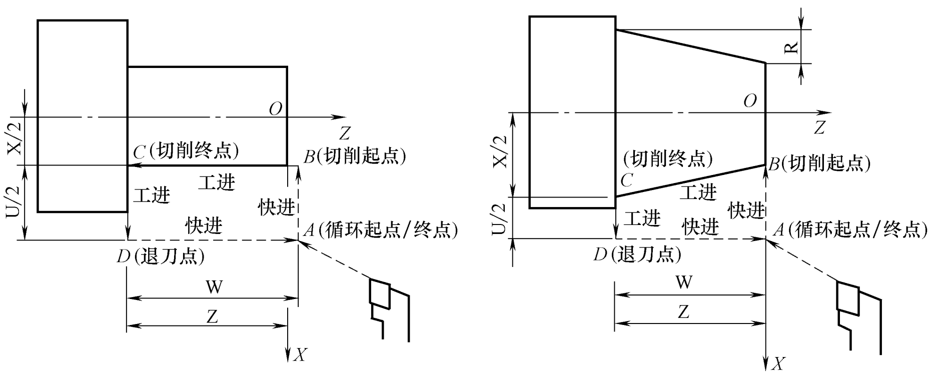
9.2.1 单一形状固定循环

单一形状固定循环指令只能完成一个面的重复切削加工，如圆柱面、圆锥面及端面等，相应的指令有圆柱和圆锥切削循环指令、端面切削循环指令。

1. 圆柱和圆锥切削循环指令 G90

G90 指令用于圆柱面（锥面）或内孔（锥孔）加工，刀具轨迹如图 9-16 所示。

刀具从 *A* 点出发，第 1 段沿 *X* 轴快速定位到 *B* 点，第 2 段进给切削到 *C* 点，第 3 段切削台阶并退刀到 *D* 点，第 4 段快速退回到出发点 *A*，完成一个切削循环。圆柱和圆锥切削循环指令 G90 格式为：



a)　　　　b)

图 9-16　G90 指令刀具轨迹

a）圆柱面切削　b）圆锥面切削

G90　X(U)__ Z(W)__ (R__) F__;

锥面切削起点半径 - 终点半径

锥面特征字，非模态量

X、Z 为切削终点绝对坐标

U、W 为切削终点相对于循环起点的增量值

【例 9-5】　用 ϕ50mm 棒料加工出 ϕ30mm×40mm 的圆柱，如图 9-17 所示。分 5 次切削，第 1~3 次背吃刀量均为 2.5mm，第 4 次背吃刀量为 2.25mm，第 5 次背吃刀量为 0.25mm。

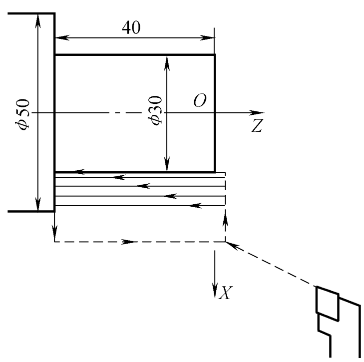


图 9-17　G90 指令应用举例

程序为：

O0903;

G97 G40 G21;

T0303;

M03 S600;

G00 X52.0 Z2.0;　　快移到循环起点
G90 X45.0 Z-40.0 F0.2;　　第 1 次循环切削
X40.0;　　第 2 次循环切削
X35.0;　　第 3 次循环切削
X30.5;　　第 4 次循环切削
X30.0 F0.1;　　第 5 次循环切削
G00 X100.0 Z50.0;　　快速返回到换刀点
M30;

2. 端面切削循环指令 G94

当轴向切削长度远小于径向切削深度时，可使用端面切削循环指令 G94，用于车端面和锥形端面切削，刀具轨迹如图 9-18 所示。

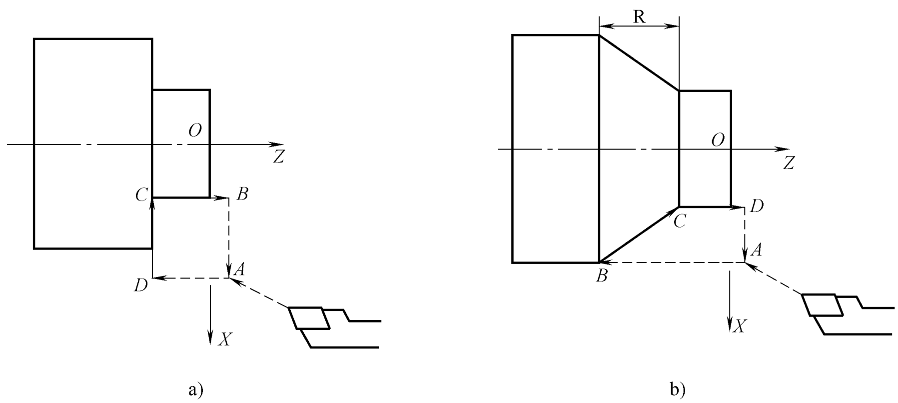


图 9-18　G94 指令刀具轨迹
a）平端面　b）锥形端面

指令格式为：

G94 X(U)__ Z(W)__ (R__) F__;

- R__：锥面切削起点 Z 坐标值 - 终点 Z 坐标值
- (R)：锥面特征字，非模态量
- X(U)、Z(W)：X、Z 为切削终点绝对坐标，U、W 为切削终点相对于循环起点的增量值

【例 9-6】 编写图 9-19 所示零件的加工程序，毛坯为 ϕ60mm 棒料。工件坐标系设定在右端面中心，以 ϕ62mm、$Z=2$ 处为锥面切削循环起点。

锥面切削 Z 方向起点 $Z_s=-20.4$，终点 $Z_e=-10$，则 $R=-10.4$。

加工程序：

O0904;
T0404;
G99 M03 S500;

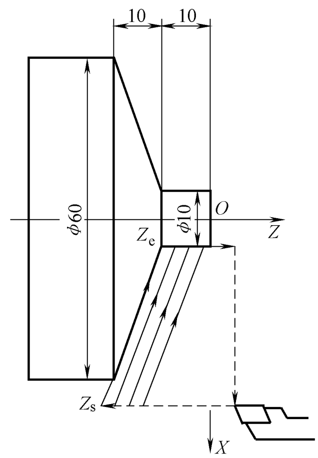


图 9-19　G94 指令应用举例

G00 X62.0 Z2.0;	快移到循环起点
G94 X10.0 Z-2.0 R-10.4 F0.1;	第 1 次循环切削，R 为非模态量
Z-4.0 R-10.4;	第 2 次循环切削
Z-6.0 R-10.4;	第 3 次循环切削
Z-8.0 R-10.4;	第 4 次循环切削
Z-10.0 R-10.4 F0.1 S800;	第 5 次循环切削
G00 X100.0 Z250.0;	快速返回到换刀点
M05;	
M30;	

9.2.2　复合形状固定循环

与单一形状固定循环指令适用于一个面的重复切削不同，复合形状固定循环指令适用于连续多个面的重复切削，只要给出零件轮廓轨迹、进刀量和退刀量、精加工余量等参数，系统会自动计算出粗加工路径和重复切削次数。复合形状固定循环指令能够实现较为复杂的零件加工，编程效率也更高。

1. 内、外圆粗车和精车循环指令 G71、G70

G71 指令适用于棒料 *X* 方向加工余量小、*Z* 方向加工余量大，且需要多次进给才能完成的外圆粗车或内孔粗车的场合；G70 指令在执行 G71 指令的基础上，对工件进行精加工。图 9-20 所示为 G71 指令刀具轨迹及不能粗车的轮廓形状。

粗车指令格式：

G71 U（Δd ）R（Δe）;

G71 P（*ns*）Q（*nf*）U（Δu）W（Δw）F;

精车指令格式：

G70 P（*ns*）Q（*nf*）F;

其中：

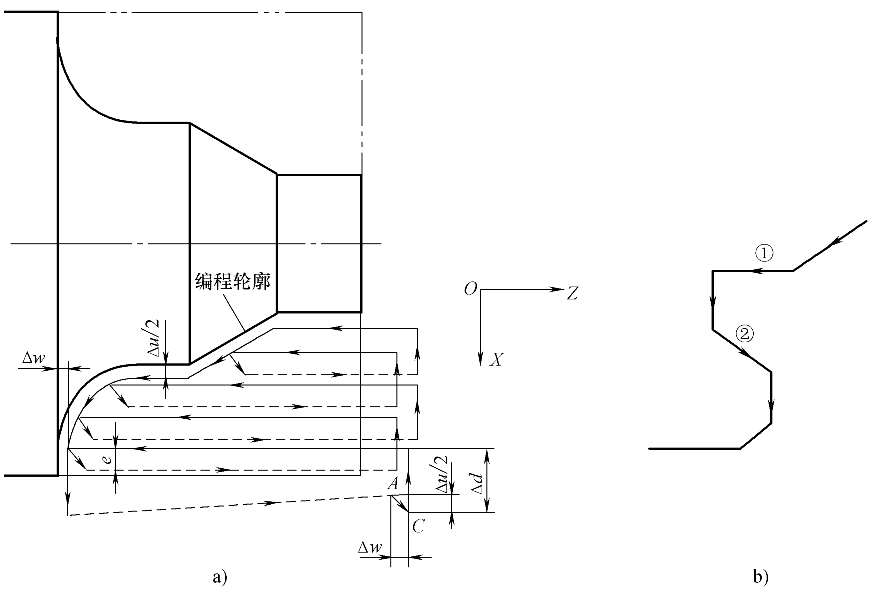


图 9-20　G71 指令刀具轨迹及不能粗车的轮廓形状
a）刀具轨迹　b）不能粗车的轮廓形状

Δd：每次径向背吃刀量（mm），半径值，无正负号。

e：每次径向退刀量（mm），半径值，无正负号。

ns：精加工程序中的开始程序段号。

nf：精加工程序中的结束程序段号。

Δu：X 轴方向的精加工余量（mm），直径值。外形轮廓加工时取正值，内孔车削时取负值。默认输入时，系统按 $\Delta u=0$ 处理。

Δw：Z 轴方向的精加工余量（mm）。默认输入时，系统按 $\Delta w=0$ 处理。

结合图 9-20a 及指令格式，G71 指令粗车外圆轨迹为：刀具从循环起点 A 开始，自动让出径向和轴向的精加工余量到 C 点，再快速沿 X 方向进给 Δd 深度，开始沿 Z 方向进行直线进给切削，然后按 45°方向快速退刀（X 方向退刀量为 e），再沿 Z 方向快速退刀，第 1 次切削加工完成；刀具 X 方向第 2 次进刀，再次进行切削加工，如此循环，最后刀具根据精加工余量 Δw 和 $\Delta u/2$，沿零件轮廓进行半精加工，结束后刀具快速退至循环起点，粗车循环指令 G71 执行完成。

要注意的是，G71 指令适用的编程轮廓沿 Z 轴必须是单调递增或递减的，否则不能切削加工，如图 9-20b 中的①和②，编程时要进行工艺处理。

【例 9-7】　零件如图 9-21 所示，毛坯棒料尺寸为 ϕ25mm×65mm。现零件左端 ϕ24mm 圆柱面已加工好，并用软卡爪夹持再加工右端，包括端面和外圆。选择 90°外圆车刀为粗加工刀具（T0101），选择 93°外圆车刀为精加工刀具（T0202）。

工件坐标系设定在右端面中心。根据零件图中的尺寸及公差要求，计算得到轮廓从 A 到 I 的交点和切点的坐标值如下：

A（10.393，－9）、B（13.983，－15）、C（13.983，－20）、D（17.983，－22）、

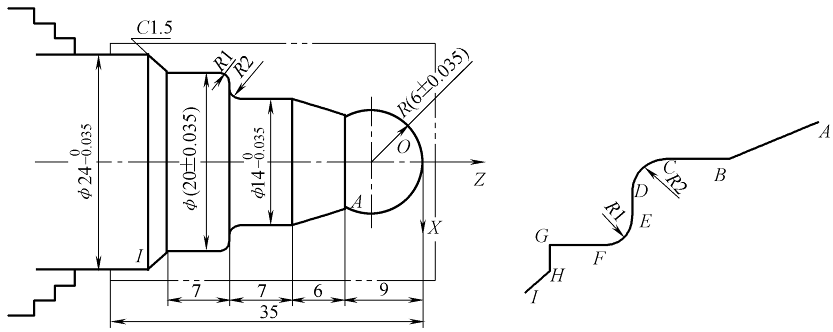


图 9-21 G71、G70 编程应用举例

E（18,−22）、*F*（20，−23）、*G*（20，−29）、*H*（20.983，−29）、*I*（23.983，−30.5）。

加工程序：

O0905；	
T0101；	换粗车刀，车削端面和粗车外圆
G99 M03 S400；	
G00 X26.0 Z5.0；	快速定位到循环起点
G94 X−1.0 Z3.0 F0.2；	端面切削循环，分 3 次切削
Z1.0；	
Z0.0；	
G71 U1.5 R0.5；	外圆粗车循环，每次背吃刀量为 1.5mm，退刀量为 0.5mm
G71 P10 Q20 U0.5 W0.1 F0.5；	精加工程序段号从 N10 始至 N20 止，精加工 *X* 方向单边余量为 0.25mm，*Z* 方向为 0.1mm
N10 G00 G41 X0.0；	精加工程序开始，从循环起点开始建立刀尖圆弧半径左补偿，并定位到切削起点
G01 Z0.0 F0.3；	
G03 X10.393 Z−9.0 R6.0；	圆弧切削到 *A* 点
G01 X13.393 Z−15.0；	*A*→*B*
Z−20.0；	*B*→*C*
G02 X17.983 Z−22.0 R2.0；	*C*→*D*，切圆弧 *R*2mm
G01 X18.0；	*D*→*E*
G03 X20.0 Z−23.0 R1.0；	*E*→*F*，切圆弧 *R*1mm
G01 Z−29.0；	*F*→*G*
X20.983；	*G*→*H*
X23.983 Z−30.5；	*H*→*I*，倒角 *C*1.5
N20 Z−35.0；	精加工程序结束
T0202；	换精车刀

G70 P10 Q20；　　外圆精车循环
G00 G40 X100.0 Z100.0；　　刀尖圆弧半径补偿撤销，回换刀点
M05；
M30；

除了内、外圆粗车循环指令 G71 外，端面粗车循环指令 G72 适用于棒料 Z 方向加工余量小、X 方向加工余量大，且需要多次粗加工的场合。G72 指令格式请参见有关编程说明书。

2. 固定形状粗车循环指令 G73

G73 指令适用于毛坯形状与零件轮廓形状基本接近的铸锻件毛坯的粗加工，并由 G70 指令进行精加工。图 9-22 所示为 G73 指令刀具轨迹。

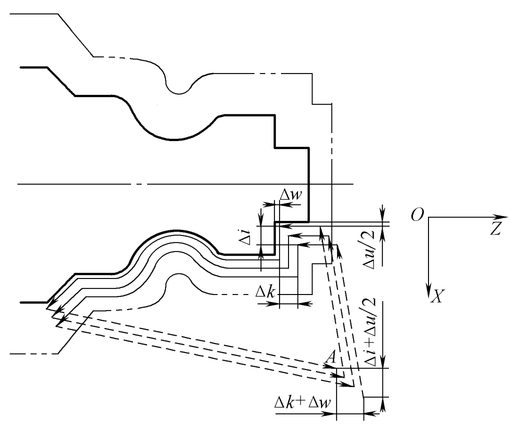


图 9-22　G73 指令刀具轨迹

粗车指令格式：

G73 U（Δi）W（Δk）R（d）；

G73 P（ns）Q（nf）U（Δu）W（Δw）F；

精车指令格式：

G70 P（ns）Q（nf）F；

其中：

Δi：X 方向总退刀量（mm），半径值指定，为模态量。

Δk：Z 方向总退刀量（mm），为模态量。

d：分层次数，为粗切重复次数，模态量。

ns：精加工程序中的开始程序段号。

nf：精加工程序中的结束程序段号。

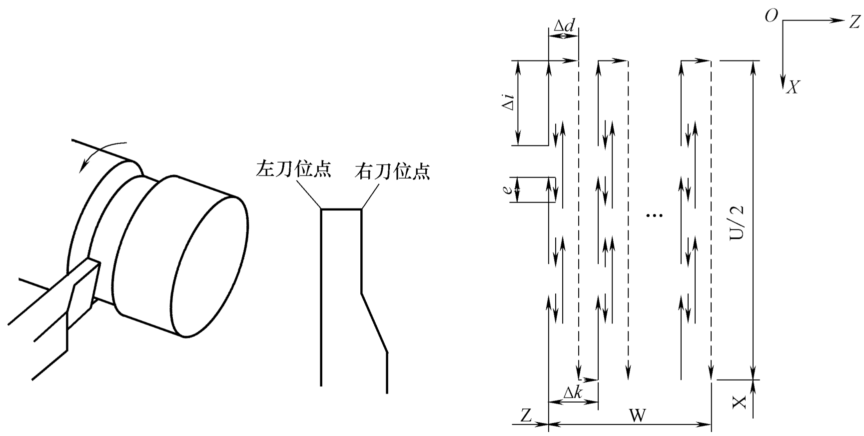
Δu：X 轴方向的精加工余量（mm），直径值。外形轮廓加工时取正值，内孔车削时取负值。默认输入时，系统按 $\Delta u=0$ 处理

Δw：Z 轴方向的精加工余量（mm）。默认输入时，系统按 $\Delta w=0$ 处理。

执行 G73 指令时，每一循环切削路线的轨迹形状是相似的，只是位置不断向工件轮廓推进，这样就可以将毛坯（铸件或锻件）待加工表面上的加工余量分层均匀地切削掉，并留出精加工余量。

9.2.3　切槽循环

径向切槽循环指令 G75 用于径向环形槽切削（图 9-23a），指令刀具轨迹如图 9-23b 所示。在 G75 指令中，刀具经过切槽循环后又回到循环起点。



a)　　　b)

图 9-23　G75 指令

a）径向环形槽切削　b）指令轨迹

指令格式：

G75 R（e）；

G75 X（U）Z（W）P（Δi）Q（Δk）R（Δd）F；

其中：

e：切槽过程中径向退刀量（mm），半径值，无正负号。

X（U）、Z（W）：切槽终点坐标，与切槽刀刀位点相对应。

Δi：切槽过程中径向的每次切入量（μm），半径值，无正负号。

Δk：沿径向切完一个刀宽后退出，在 Z 方向的移动量（μm），其值应小于刀宽。

Δd：刀具切到槽底后，在槽底沿 Z 方向的退刀量（μm）。Δd 尽量不要设置数值，以免断刀。

【例 9-8】　某轴上的径向环形槽如图 9-24 所示。工件坐标系设定在工件右端面中心，切槽刀宽 4mm，以左刀尖为刀位点。

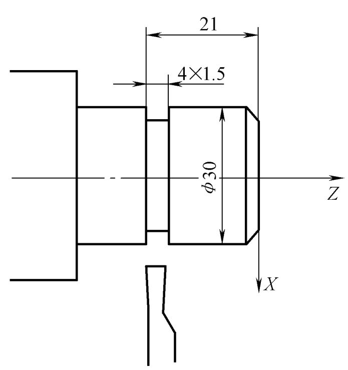


图 9-24　G75 指令径向切槽编程应用举例

加工程序：

```
O0906;
T0202;
G99 M03 S1000;
G00 X32.0 Z-21.0;
G75 R0.5;
G75 X27.0 Z-21.0 P1000 F0.1;
```

G00 X100.0 Z50.0；

M05；

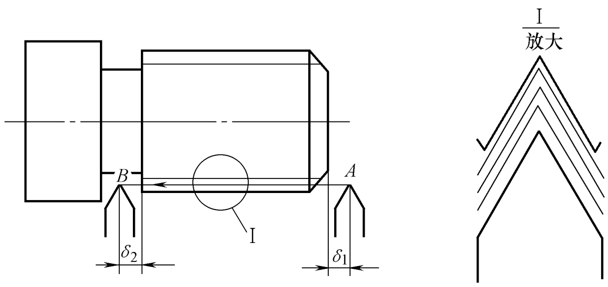
M30；

除了径向切槽循环指令 G75 外，还有端面切槽循环指令 G74，用于端面环形槽加工，或在端面中心钻孔。G74 指令格式请参见有关编程说明书。

9.2.4 螺纹切削循环

1. 单行程螺纹切削指令 G32

G32 指令用于圆柱螺纹、圆锥螺纹等单行程螺纹切削，如图 9-25 所示。



a) b)

图 9-25 G32 指令

a）刀具轨迹 b）直切法车削三角形螺纹

指令格式：

G32 X(U)__ Z(W)__ F__；

——螺纹导程

——X、Z 为螺纹终点坐标，U、W 为螺纹终点相对于起点的增量值

执行 G32 指令时，刀具从起点 *A* 出发，以每转一个螺纹导程的进给速度切削到螺纹终点 *B*；在指定主轴转速 S 指令（r/min）后，系统会根据螺纹导程自动确定进给速度。另外，必须设置螺纹加工升速段 δ_1 和降速段 δ_2，以避免进给起动加速和停止减速造成的螺距误差。受牙型深度的影响，要分配每次进给的背吃刀量，采用分层进给，执行 G32 指令时，车刀切深采用直进法，即车刀两侧刃同时切削，切削力较大，牙型准确，但排屑困难，容易产生轧刀现象，如图 9-25b 所示。

【例 9-9】 如图 9-26 所示，车削 M30×2 圆柱螺纹，现螺纹外圆柱和退刀槽已加工完成。螺纹小径 = 螺纹大径 − 1.0825*P* = 30mm − 1.0825mm×2 = 27.835mm，牙型高度为 2.165mm，每次背吃刀量（直径值）分别为：0.9mm、0.6mm、0.6mm、0.065mm。

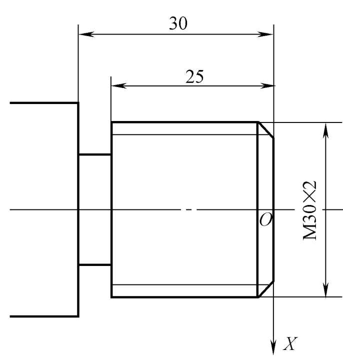


图 9-26 G32 指令螺纹单行程编程应用举例

加工程序：

O0907；

```
T0303;
M03 S600;
G00 X29.1 Z5.0;             第 1 次切深起刀点
G32 Z-28.0 F2.0;            第 1 次螺纹单行程切削
G00 X31.0;                  X 方向退刀
Z5.0;                       Z 方向退刀
X28.5;                      第 2 次切深起刀点
G32 Z-28.0 F2.0;            第 2 次螺纹单行程切削
G00 X31.0;
Z5.0;
X27.9;                      第 3 次切深起刀点
G32 Z-28.0 F2.0;            第 3 次螺纹单行程切削
G00 X31.0;
Z5.0;
X27.835;                    第 4 次切深起刀点
G32 Z-28.0 F2.0;            第 4 次螺纹单行程切削
G00 X100.0;                 先 X 方向退刀，再 Z 方向退刀，以避免退刀时刀
                            具碰撞已加工好的螺纹
Z50.0;
M05;
M30;
```

2. 螺纹切削单一固定循环指令 G92

G92 指令主要用于圆柱螺纹及圆锥螺纹的单一循环切削，可以完成由进刀、切螺纹、退出和返回四个动作组成的一次进给切削循环，如图 9-27 所示。

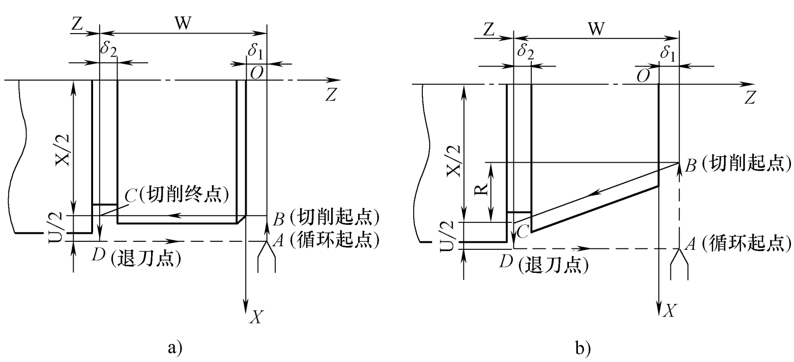


图 9-27　G92 指令
a）圆柱螺纹　b）圆锥螺纹

指令格式：

G92 X(U)__ Z(W)__ (R__) F__;

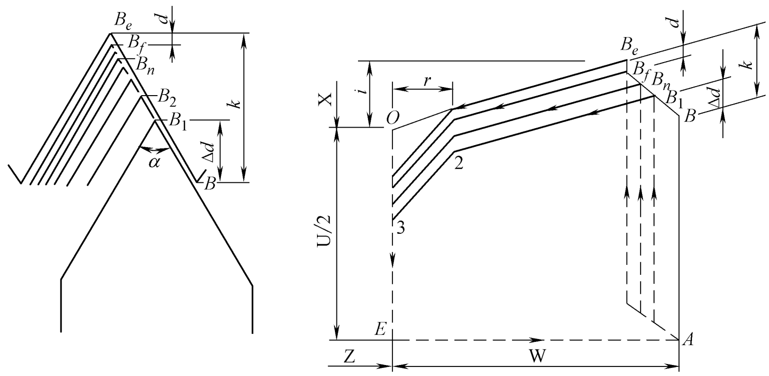
- F：螺纹导程
- R：圆锥螺纹切削起点半径 - 螺纹切削终点半径
- (R)：锥面特征字，非模态量
- X(U)、Z(W)：绝对值编程时 X、Z 为螺纹切削终点坐标；增量值编程时 U、W 为螺纹切削终点相对循环起点的增量值

执行 G92 指令时，刀具从循环起点 *A* 沿 *X* 方向快速移动至 *B* 点，然后以每转进给一个导程的速度沿 *Z* 方向切削进给至 *C* 点，再从 *X* 方向快速退刀至 *D* 点，最后返回到循环起点 *A*，完成一个螺纹循环加工。用 G32 指令编制螺纹切削加工程序时，刀具的切入和切出都需要单独编制语句，程序段较多，应用 G92 指令可简化螺纹切削加工程序。对图 9-26 所示的螺纹进行加工，用 G92 指令编写的加工程序为：

```
O0908;
T0303;
M03 S600;
G00 X32.0 Z5.0;              快速定位到螺纹循环切削起点
G92 X29.1 Z-28.0 F2.0;       第 1 次螺纹切削循环
X28.5;                       第 2 次螺纹切削循环
X27.9;                       第 3 次螺纹切削循环
X27.835;                     第 4 次螺纹切削循环
G00 X100.0 Z50.0;
M05;
M30;
```

3. 螺纹切削复合循环指令 G76

G76 指令主要用于执行螺纹切削多重复合循环，可加工带螺纹退尾的直螺纹和锥螺纹。执行 G76 指令时，车刀切深采用斜切法，如图 9-28a 所示，即车刀沿着螺纹一侧逐层进给，



a)　　b)

图 9-28　G76 指令

a）斜切法车削三角形螺纹　b）刀具轨迹

且背吃刀量自动递减，有利于减小切削阻力，排屑容易，提高了刀具寿命，适用于大螺距螺纹的加工。斜进法因为车刀单侧刃逐层进给，所以加工的螺纹面不直，从而造成牙型精度较低，为此，在加工较高精度要求的螺纹时，G76 指令执行过程中先用斜切法进行粗加工，再用直切法进行精加工。

在执行 G76 指令时，数控系统根据设定的牙型高、牙型角、第 1 次切深及精加工余量等参数，自动确定分层切削的深度。刀具轨迹如图 9-28b 所示。刀具从循环起点 A 出发，沿 X 方向快速到达 B 点（该点的坐标值=小径+2 倍的牙型高），然后沿牙型一侧平行的方向工进 Δd 到点 B_1 后，切削螺纹至点 2，再 45°斜向退刀至点 3，快速退刀至 E 点，再返回 A 点，如此重复循环切削，完成螺纹加工。若留有精加工余量，则最后进行精加工切削。

指令格式：

G76 P(m)(r)(α) Q（Δd_{min}）R(d)；

G76 X(U) Z(W) R(i) P(k) Q(Δd)F；

其中：

m：精加工重复次数（01~99），必须用两位数表示。

r：螺纹收尾 45°斜向退刀 Z 方向距离。当螺距由 P 表示时，可以从 0.1P 到 9.9P 设定，用 00 ~ 99 两位数表示。螺纹退尾功能可实现无退刀槽的螺纹加工，当螺纹尾端有退刀槽时，r 可设定为 00。

α：刀尖角度（螺纹牙型角），有 6 种选择：80、60、55、30、29、0，用两位数表示。例如：当 $m=2$，$r=1.2$P，$\alpha=60°$时，表示为 P021260。

Δd_{min}：最小背吃刀量（mm），半径值。

d：精加工余量（μm），半径值。

X(U)、Z(W)：螺纹终点坐标。

i：螺纹锥度，即螺纹起点与螺纹终点的半径差，当 $i=0$ 时，为圆柱螺纹，可以不写。

k：螺纹牙型高度（μm），半径值。

Δd：第一次切深度（μm），半径值无正负号。

F：螺纹导程。

【例 9-10】 车削图 9-29 所示的 M68×6 圆柱外螺纹。已知：螺纹小径为 ϕ61.51mm，螺纹牙型高度为 3.24mm。用 60°螺纹车刀进行粗、精循环车削，精加工次数为 1 次，精加工余量为 0.2mm；因无退刀槽，螺纹收尾长度为 1.0P（P 为螺纹导程 6mm）；最小背吃刀量为 0.1mm；第 1 次背吃刀量（半径值）为 1.8mm。

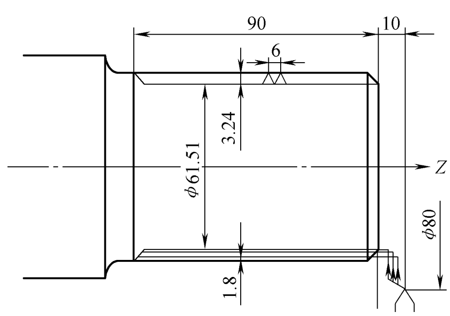


图 9-29　螺纹切削复合循环指令 G76 编程举例

加工程序：

O0909；

T0303；

```
M03 S400;
G00 X80.0 Z10.0;
G76 P011060 Q100 R200;
G76 X61.51 Z-90.0 P3240 Q1800 F6.0;
G00 X100.0 Z50.0;
M05;
M30;
```

9.2.5 编程实例

车削图 9-30 所示的轴零件。毛坯为 45 钢 ϕ45mm 棒料，两端面已车至尺寸 120mm。

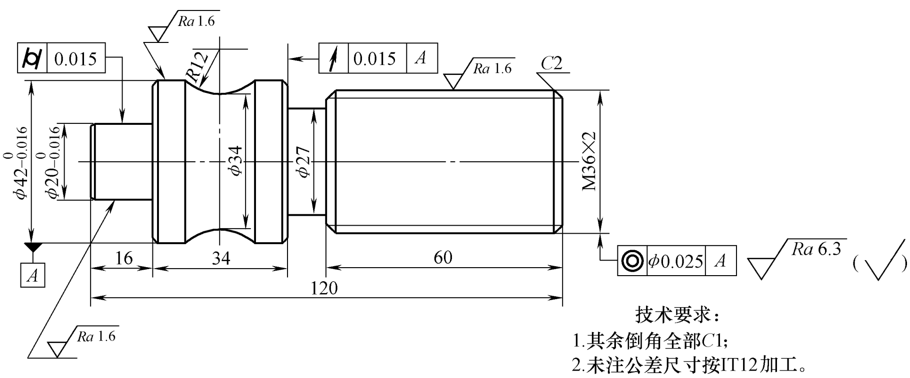


图 9-30　轴零件加工实例

1. 工艺分析

工序 1：以棒料毛坯外圆作为定位基准，用自定心卡盘夹紧，车削零件 $\phi20^{0}_{-0.016}$mm 外圆、$\phi42^{0}_{-0.016}$mm 外圆、R12mm 圆弧及倒角，如图 9-31a 所示。

工序 2：零件调头，以加工好的 $\phi42^{0}_{-0.016}$mm 外圆作为定位基准，用自定心卡盘夹紧，车削 M36×2 螺纹外圆、ϕ27mm 槽、倒角及 M36×2 螺纹，如图 9-31b 所示。

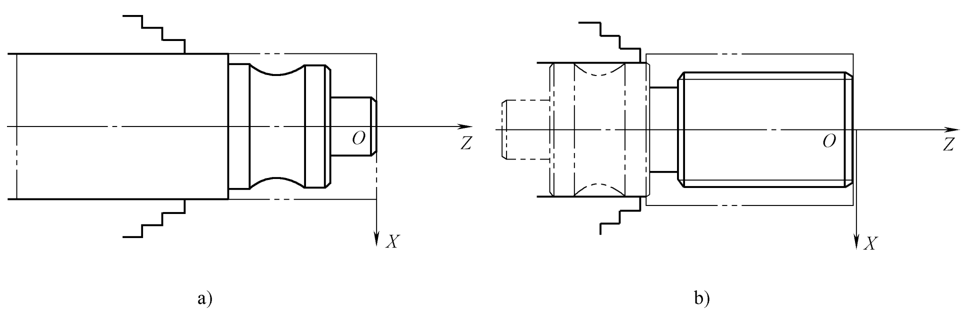
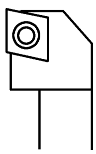
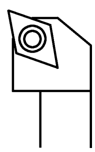
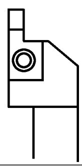
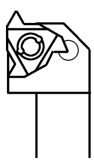


图 9-31　零件装夹定位

a）以棒料毛坯外圆定位　b）以 $\phi42^{0}_{-0.016}$mm 外圆定位

零件加工所需刀具及切削参数见表 9-1。

表 9-1　零件加工所需刀具及切削参数

车刀名称及简图	刀　　号		主轴转速 /(r/min)	进给速度 /(mm/r)	用　　途
外圆左偏粗车刀 	T01	工序 1	600	0.15	粗车 $\phi20_{-0.016}^{0}$mm 外圆、$\phi42_{-0.016}^{0}$mm 外圆、R12mm 圆弧及倒角
		工序 2	800	0.15	粗车 M36×2 螺纹的外圆及倒角
外圆左偏精车刀 	T02	工序 1	1000	0.15	精车 $\phi20_{-0.016}^{0}$mm 外圆、$\phi42_{-0.016}^{0}$mm 外圆、R12mm 圆弧及倒角
		工序 2	1000	0.08	精车 M36×2 螺纹的外圆及倒角
切槽刀（刀宽 4mm） 	T03		粗车:300 精车:350	粗车:0.05 精车:0.03	粗、精车 $\phi27$mm 径向槽
螺纹车刀 	T04		400	—	车 M36×2 螺纹

2. 加工程序

工序 1：

```
O0910;
T0101 M03 S600;                  换 T01 外圆粗车刀
M08;
G00 X48.0 Z2.0;                  车刀快速定位到外圆切削循环起点
G71 U2.0 R0.5;                   外圆粗车循环，每次背吃刀量为 2mm，退刀
                                 量为 0.5mm
G71 P10 Q20 U0.5 W0.25 F0.15;    精车余量 X 方向为 0.5mm，Z 方向为 0.25mm
N10 G00 G41 X18.0;               建立刀尖圆弧半径左补偿
Z2.0;
G01 X20.0 Z-1.0 F0.08;           倒角 C1
Z-16.0;
X40.0;
X42.0 W-1.0;                     倒角 C1
W-7.056;
G02 W-17.888 R12.0;              车 R12mm 圆弧
```

G01 W-8.056；	
N20 X44.0；	
G00 G40 X100.0 Z150.0；	撤销刀尖圆弧半径补偿至换刀点
T0202 S1000；	换 T02 外圆精车刀
G00 X46.0 Z2.0；	
G70 P10 Q20；	精车循环
G00 X100.0 Z150.0 M05；	快速回换刀点
M09；	
M30；	
工序 2：	
O0911；	
T0101 M03 S800；	换 T01 外圆车刀
M08；	
G00 X48.0 Z2.0；	车刀快速定位到外圆切削循环起点
G71 U2.0 R0.5；	外圆粗车循环，每次背吃刀量为 2mm，退刀量为 0.5mm
G71 P30 Q40 U0.5 W0.25 F0.15；	精车余量 *X* 方向为 0.5mm，*Z* 方向为 0.25mm
N30 G00 X32.0；	
G01 Z0 F0.2；	
X35.74 Z-2.0 F0.08；	倒角 *C*2，车至 M36×2 螺纹外圆尺寸 ϕ35.74mm
Z-70.0；	
X40.0；	
N40 X44.0 Z-72.0；	倒角 *C*1
G00 X100.0 Z150.0；	快速回换刀点
T0202 S1000；	换 T02 外圆精车刀
X46.0 Z2.0；	
G70 P30 Q40；	精车循环
G00 X100.0 Z150.0；	快速回换刀点
T0303 S300；	换 T03 切槽刀
G00 X45.0 Z-69.9；	切槽刀左刀尖为刀位点，快速定位到切槽循环起点
G75 R0.5；	退刀量为 0.5mm
G75 X27.2 Z-69.9 P1000 Q3000 F0.05；	*X* 方向精加工余量为单边 0.1mm，*Z* 方向为 0.1mm，每次径向背吃刀量为 1mm，每次轴向移动量为 3mm
G00 Z-70.0；	
X45.0；	
S350；	
G01 X27.0 F0.03；	左槽壁精加工

Z-64.0；	槽底精加工
X32.0；	右槽壁精加工
X35.74 Z-62；	倒角 *C*2
G00 X100.0 Z150.0；	快速回换刀点
T0404 M03 S400；	换 T04 螺纹车刀
G00 X43.0 Z2.0；	
G76 P010060 Q100 R20；	螺纹粗车多次循环，精车 1 次，因有退刀槽，故螺纹尾端倒角值为 00，螺纹牙型角为 60°，最小背吃刀量为 0.1mm，精车余量为 0.02mm
G76 X33.835 Z-61.0 P1082 Q300 F2.0；	车直螺纹，牙型高度为 1.082mm，第 1 次背吃刀量为 0.03mm，螺距为 2mm
G00 X100.0 Z150.0 M05；	快速回换刀点，主轴停
M09；	
M30；	

思考题与习题

1. 根据如下车削程序，画出轴零件轮廓形状并标注尺寸。

```
O0912；
T0101；
G40 G99 G96 S125 M03；
G00 X42.0 Z0 M08；
G01 X-1.0 F0.08；
Z2.0；
G00 X42.0 Z3.0；
G71 U2.0 R1.0；
G71 P10 Q20 U0.5 W0 F0.13；
N10 G42 G00 X-3.0 Z1.0；
G03 X19.0 Z-10.0 F0.08；
G01 W-9.0；
X26.0 W-10.0；
W-12.0；
X29.314；
G02 X33.405 W-7.0 R13.0；
G01 X36.0；
Z-56.0；
X40.0；
Z-65.0；
N20 G40 G00 X42.0；
```

```
G00 Z150.0;
T0202;
G40 G99 G96 S125 M03;
G00 X40.0 Z3.0;
G70 P10 Q20;
G00 Z150.0;
M05;
M30;
```

2. 车削图 9-32 所示的工件。毛坯为 ϕ65mm×80mm 棒料，ϕ65mm 为装夹端，要求车削端面，粗、精车外圆，且长度方向车削至 60mm 处。

3. 车削图 9-33 所示零件的内圆。毛坯已预先钻 ϕ8mm 内孔，粗、精车至规定尺寸。选择背吃刀量为 1.5mm（半径值），退刀量为 1mm，*X* 方向精加工余量为 0.4mm，*Z* 方向精加工余量为 0.1mm；循环起点设置在 ϕ6mm、距离端面为 5mm 处。编写加工程序。

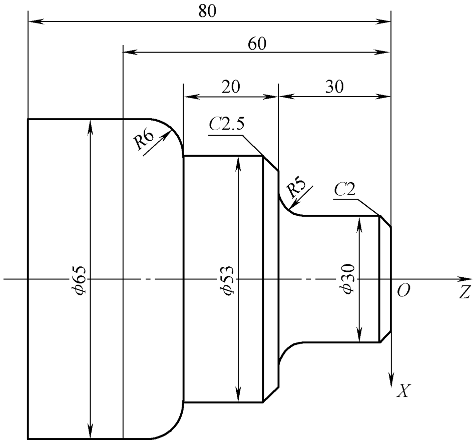


图 9-32　题 2 图

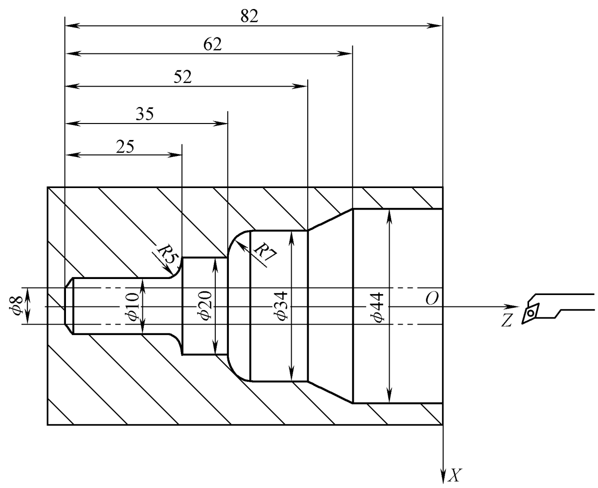


图 9-33　题 3 图

4. 车削图 9-34 所示的工件。毛坯为 ϕ65mm 棒料，夹持端 ϕ62mm 外圆已加工好，并以此为定位基准，用自定心卡盘夹紧。要求：

1）车削端面。

2）车削 M30×1.5 螺纹外圆、*C*1 倒角、ϕ34mm 圆锥、ϕ40mm 外圆及 *R*5mm 圆弧。

3）切槽 ϕ26mm×4mm。

4）车外螺纹 M30×1.5。

编写加工程序。

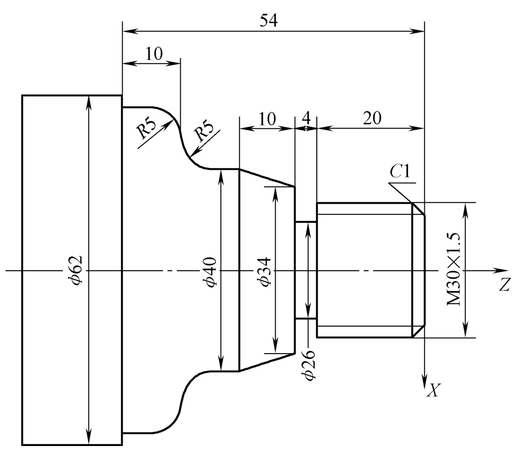
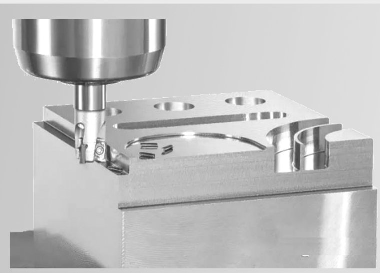


图 9-34　题 4 图



第 10 章

数控铣床及加工中心加工程序

10.1 铣削指令

数控铣削通常包括平面铣削、轮廓铣削及型腔铣削等。数控铣床和加工中心辅助功能基本 M 指令与数控车床相同，如主轴正、反转起动和停止，切削液开、关等；根据铣削加工的特点，铣削基本指令还包括平面选择指令、运动指令，以及刀具半径补偿和长度补偿指令等。

10.1.1 加工平面选择指令

数控铣床和加工中心 X、Y、Z 轴构成了三个平面，如图 10-1 所示，对应指令为：

G17：XOY 平面。

G18：XOZ 平面。

G19：YOZ 平面。

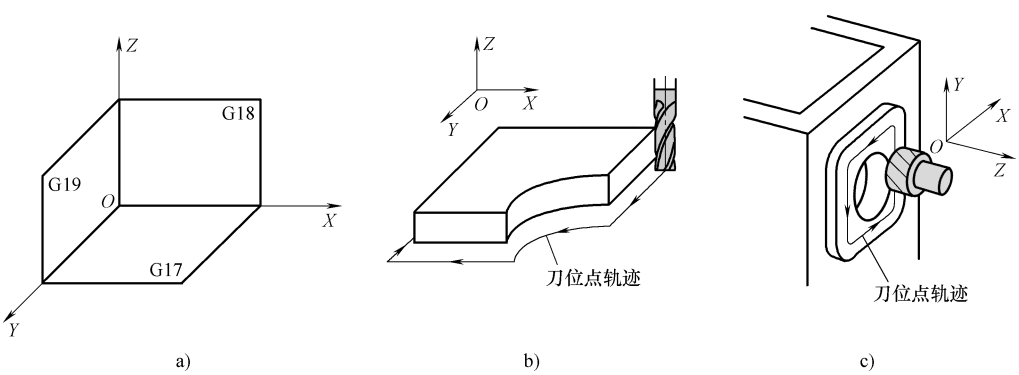
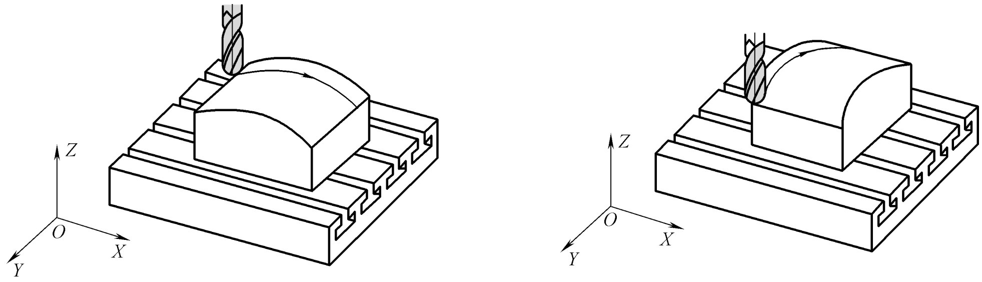


图 10-1 加工平面选择指令

a）平面选择 b）立式数控铣床 G17 指令 c）卧式数控铣床 G17 指令

选择加工平面的目的在于确定刀具刀位点轨迹所处的平面，大多数情况下，立式、卧式数控铣床和加工中心的加工平面用 G17 指令设定，针对数控铣床和加工中心的数控系统，开机默认为 G17 状态。在有些情况下，加工平面要用 G18 或 G19 指令设定，如图 10-2 所示。

图 10-2a 中，球头铣刀刀位点（位于球心）的圆弧轨迹在 XOZ 平面内，故加工平面用



a)　　　　b)

图 10-2　G18 和 G19 指令

a）刀位点轨迹平面在 G18 中　b）刀位点轨迹平面在 G19 中

G18 指令设定；而在图 10-2b 中，球头铣刀刀位点的圆弧轨迹在 *YOZ* 平面内，故加工平面用 G19 指令设定。

10.1.2　运动指令

1. 快速定位指令 G00

数控铣削加工过程中，G00 指令用于刀具从一个位置到另一个位置的快速定位，如快进和快退；刀具在移动过程中不进行切削，快速定位速度由数控系统参数设定。如图 10-3 所示，在 G17 平面中，刀具从 *A* 点快速定位到 *B* 点。

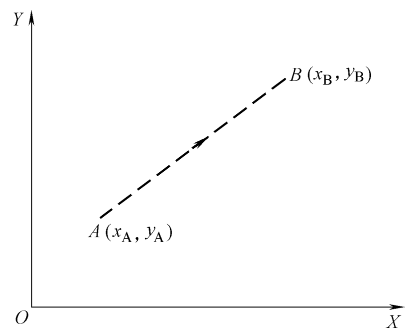


图 10-3　G00 指令

指令格式：

绝对值：N×× G17　G90　G00　X__　Y__；

- X__ Y__ —— 终点坐标值（X = x_B，Y = y_B）
- G90 —— 绝对坐标值指令
- G17 —— 加工平面指令（可省略）

增量值：N×× G17　G91　G00　X__　Y__；

- X__ Y__ —— 终点坐标相对于起点坐标的增量值（X = $x_B - x_A$，Y = $y_B - y_A$）
- G91 —— 增量坐标值指令

2. 直线插补指令 G01

刀具以直线轨迹进行切削加工，进给速度由 F 指令指定；加工方向的确定需考虑顺铣或逆铣的工艺要求。如图 10-4 所示，在 G17 平面中，刀具从 *A* 点以一定进给速度运动到 *B* 点。

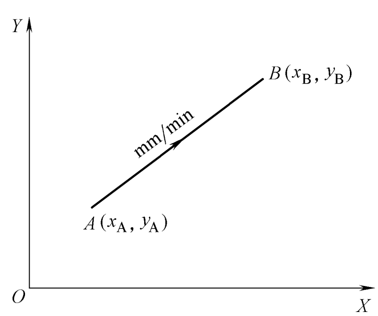


图 10-4　G01 指令

指令格式：

$\begin{Bmatrix} \text{G90} \\ \text{G91} \end{Bmatrix}$ G01 X__　Y__　F__；

- F__ —— 进给速度，通常用 mm/min

【例 10-1】 在图 10-5 所示的运动轨迹中，刀具从 O 点快移至 A 点，以 80mm/min 的进给速度进给至 $B \to C \to D \to E \to A$，再快速返回到 O 点。

按绝对值编写的程序如下：

G90 G00 X30.0 Y40.0;	快速定位到 A 点
G01 Y90.0 F80 ;	直线 $A \to B$
X130.0;	$B \to C$
Y40.0;	$C \to D$
X80.0 Y60.0;	$D \to E$
X30.0 Y40.0;	$E \to A$
G00 X0 Y0;	快速返回 O 点

请读者用 G91 指令再编写运动轨迹程序。

3. 圆弧插补指令 G02、G03

刀具以圆弧轨迹进行切削加工，进给速度由 F 指令指定。数控铣削中，各平面内 G02、G03 指令的定义如图 10-6 所示。

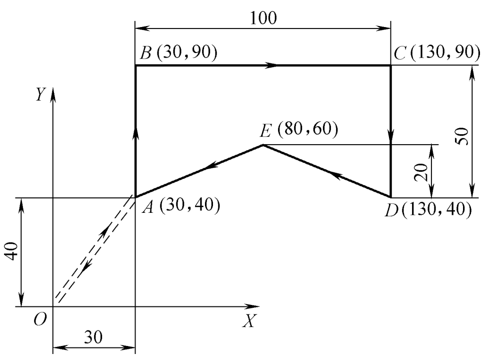


图 10-5　G00 和 G01 指令应用举例

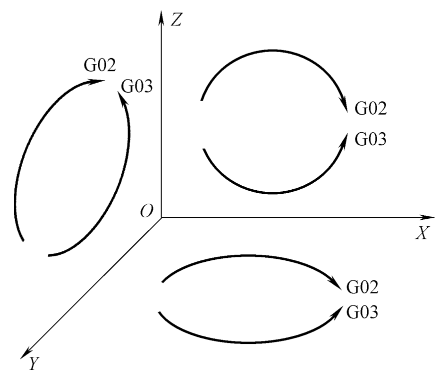


图 10-6　G02、G03 指令的定义

G02：沿着与加工平面垂直轴的负方向看去，顺时针方向的圆弧。

G03：沿着与加工平面垂直轴的负方向看去，逆时针方向的圆弧。

图 10-7 中，G17 指令平面中 G02、G03 指令格式为：

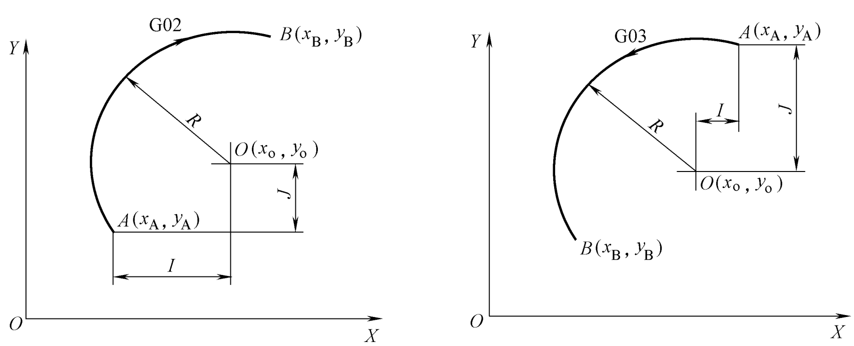


图 10-7　G17 中的 G02、G03 指令

半径值编程：

$$N\times\times\ G17\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}\ X_\ \ Y_\ \ R_\ \ F_;$$

- R：圆弧半径
- X、Y：G90 指令时圆弧终点坐标（$X=x_B, Y=y_B$）；G91 指令时圆弧终点与起点坐标增量值（$X=x_B-x_A, Y=y_B-y_A$）

圆心值编程：

$$N\times\times\ G17\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}X_Y_\ \ I_\ \ J_\ \ F_;$$

- J：圆弧圆心 *Y* 坐标相对圆弧起点 *Y* 坐标（$J=y_O-y_A$）
- J：*Y* 轴的辅助轴
- I：圆弧圆心 *X* 坐标相对圆弧起点 *X* 坐标（$I=x_O-x_A$）
- I：*X* 轴的辅助轴

说明：

1）整圆编程时不能用半径值编程。

2）圆弧对应的圆心角为 0°～180°时，R 为正；圆心角为 180°～360°时，R 为负；对于 180°的圆弧，R 为正、负均可。

3）铣刀铣削内轮廓圆弧时，铣刀半径要小于或等于内轮廓最小圆弧的半径，否则会产生轮廓过切现象。

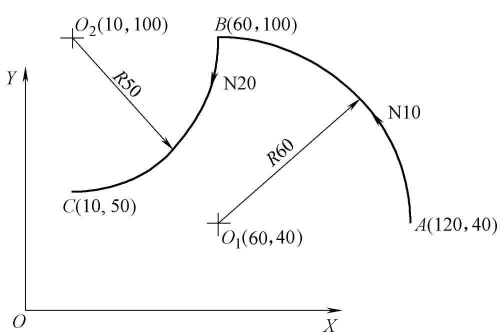


图 10-8　G02、G03 指令用于举例

【例 10-2】 在图 10-8 所示的圆弧轨迹中，刀具从 *A* 点以 80mm/min 的进给速度圆弧进给到 *B* 点，再圆弧进给到 *C* 点。

半径值编程：

N10 G90 G03 X60.0 Y100.0 R60.0 F80；

N20 G02 X10.0 Y50.0 R50.0；

圆心值编程：

N10 G90 G03 X60.0 Y100.0 I-60.0 J0 F80；

N20 G02 X10.0 Y50.0 I-50.0 J0；

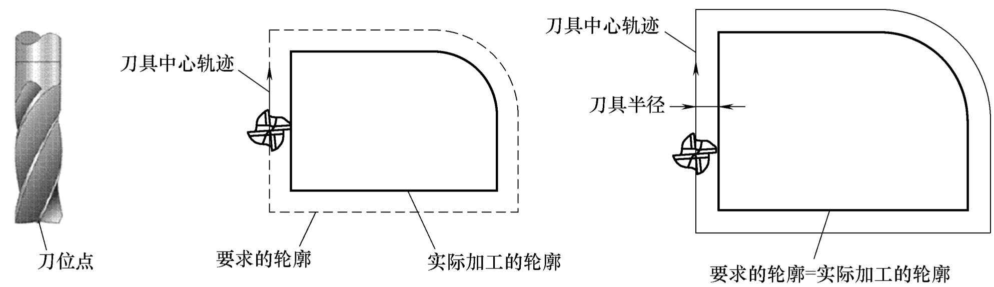
请读者用 G91 指令再编写运动轨迹程序。

10.1.3　刀具补偿

1. 刀具半径补偿指令 G41、G42、G40

数控铣削加工程序中的坐标值是按零件轮廓进行编程的，因为铣刀有一定的半径，若不

进行刀具半径补偿处理，刀位点轨迹（又称刀具中心轨迹）就沿零件轮廓行进，则实际加工出来的零件尺寸要比要求的轮廓小一圈（外轮廓加工）或大一圈（内轮廓加工），如图 10-9a 所示。刀具半径补偿的目的就是，刀具中心沿零件轮廓法向偏移一个刀具半径，使实际加工出来的零件轮廓与要求的轮廓一致，如图 10-9c 所示。



a)　　　　b)　　　　c)

图 10-9　刀具半径补偿

a）立铣刀刀位点　b）无补偿时　c）有补偿时

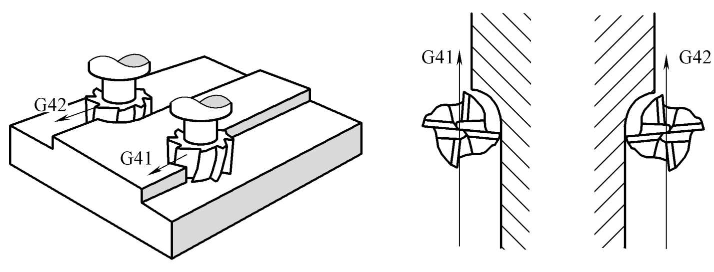
如图 10-10 所示，刀具半径补偿指令有：

G41：左补偿指令。从加工方向看，刀具在零件轮廓左边。

G42：右补偿指令。从加工方向看，刀具在零件轮廓右边。

G40：半径补偿撤销指令。该指令使 G41、G42 指令无效。

G41、G42 和 G40 指令为模态量。



a)　　　　b)

图 10-10　G41、G42 指令

a）G41、G42 指令定义　b）零件轮廓与刀具中心轨迹

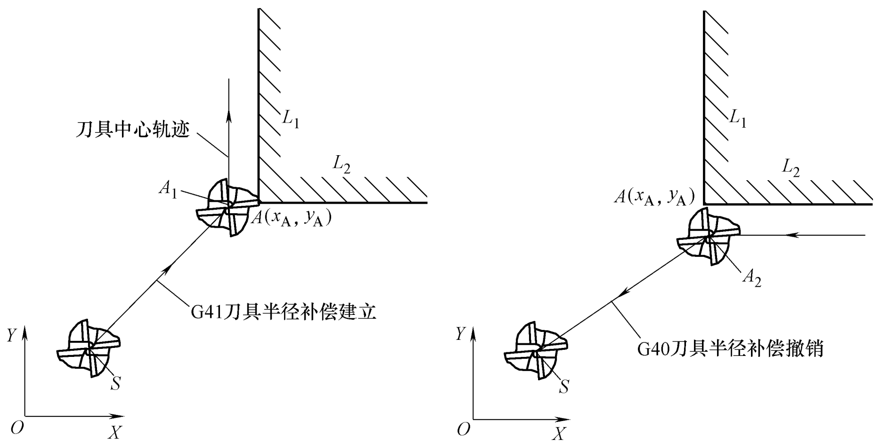
数控系统根据零件轮廓和刀具半径自动计算刀位点轨迹，控制刀具沿刀具中心轨迹运动。刀具半径补偿建立与撤销如图 10-11 所示。

设刀具半径补偿在 G17 平面中进行，则指令格式：

$$G17 \begin{Bmatrix} G00 \\ G01 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} G41 \\ G42 \\ G40 \end{Bmatrix} \quad X__ \quad Y__ \quad D__ \quad (F__);$$

D__：刀具半径补偿寄存器地址，设定半径补偿值

X__ Y__：刀具半径补偿建立或撤销直线段的终点坐标



a)　　　　　　　　　　b)

图 10-11　刀具半径补偿建立与撤销

a）刀具半径补偿建立　b）刀具半径补偿撤销

（1）刀具半径补偿建立　在刀补建立阶段，S 是刀具加工起点，A 是轮廓 L_1 加工起点，数控系统对 G41 或 G42 指令程序段处理后，根据 A 点坐标和 D 寄存器设定的刀具半径补偿值，刀具中心从 S 位置开始直线偏移到 A_1 位置，刀具半径补偿建立完成，以后刀具中心按零件轮廓轨迹运动，如图 10-11a 所示。

（2）刀具半径补偿撤销　在刀补撤销阶段，刀具沿轮廓 L_2 切削，当到达 A 位置时，数控系统执行 G40 指令程序段后，刀具中心从 A_2 位置沿直线返回到刀具加工起点 S，刀具半径补偿撤销完成，如图 10-11b 所示。

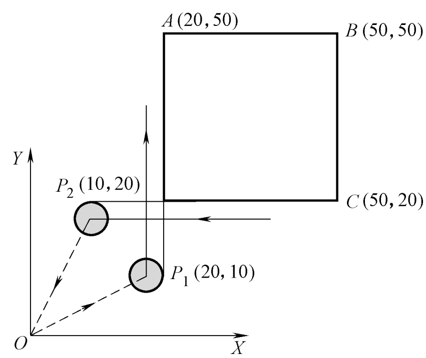


图 10-12　刀具半径补偿编程

【例 10-3】　用刀具半径补偿指令编制图 10-12 所示的加工程序（Z 方向不考虑），刀具直径为 ϕ20mm。刀具半径补偿 D01 设定为 10。

加工程序：

O1001；	
G54 G17 G90 G00 X0 Y0；	设定工件坐标系和加工平面，刀具快移到加工起点
M03 S1000；	
G41 X20. 0 Y10. 0 D01；	刀具半径左补偿建立，直线快移到 P_1 点
G01 Y50. 0 F100；	直线进给 $P_1 \to A$
X50. 0；	$A \to B$
Y20. 0；	$B \to C$
X10. 0；	$C \to P_2$
G40 X0 Y0；	刀具半径补偿撤销，并快速返回起点
M05；	
M30；	

2. 刀具长度补偿指令 G43、G44、G49

数控铣床和加工中心所用的刀具有不同的长度，数控程序中 Z 坐标值是按一定的基准长度进行编写的。若不考虑刀具长度的作用，则刀具实际移动的距离与要求的距离不一致，严重的话会导致刀具撞击工件。刀具长度补偿就是在编程时不考虑刀具长度对 Z 坐标值的影响，只要设定好一个长度基准，其他刀具相对长度基准设置长度补偿值即可。刀具长度补偿只对 Z 轴有效。刀具长度补偿指令有：

G43：刀具长度正补偿指令，表示刀具实际移动量=编程指令移动量+补偿量。

G44：刀具长度负补偿指令，表示刀具实际移动量=编程指令移动量−补偿量。

G49：刀具长度补偿撤销指令。

G43、G44、G49 指令为模态量。

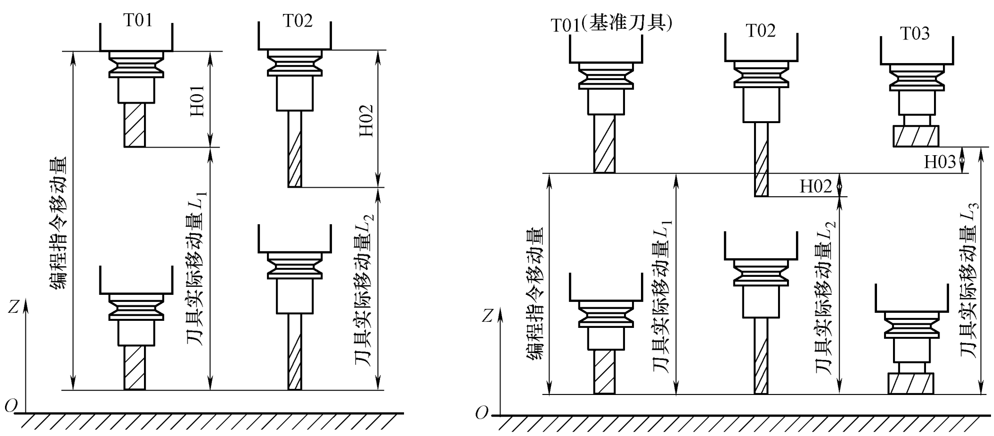
指令格式：

$\begin{Bmatrix} \text{G00} \\ \text{G01} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{G43} \\ \text{G44} \\ \text{G49} \end{Bmatrix}$ Z__ H__ （F__）；

H__：刀具长度补偿寄存器地址，设定长度补偿值

Z__：刀具长度补偿建立或撤销直线段的终点坐标

刀具长度补偿有两种方法：一是以主轴端面中心作为 Z 坐标编程依据，刀具实际长度为补偿量，如图 10-13a 所示；二是以某把刀具的长度作为基准，并以此刀具的刀位点作为 Z 坐标编程依据，其他刀具的补偿量是该刀具长度与基准刀具长度的差值，如图 11-13b 所示。



a)　　b)

图 10-13　加工中心刀具长度补偿

a）以刀具长度作为补偿量　b）以刀具长度差值作为补偿量

图 10-13a 中，长度补偿量 H01 为刀具 T01 的实际长度，长度补偿量 H02 为刀具 T02 的实际长度，补偿指令用 G44 指定。执行长度补偿指令后，T01 实际移动量为 L_1，T02 实际移动量为 L_2。

图 10-13b 中，T01 为基准长度刀具，其编程指令移动量等于刀具实际移动量 L_1，无须长度补偿；T02 与 T01 的差值 H02 作为 T02 长度补偿量，补偿指令为 G44，执行补偿指令

后，T02 实际移动量为 L_2；T03 与 T01 的差值 H03 作为 T03 长度补偿量，补偿指令为 G43，执行补偿指令后，T03 实际移动量为 L_3。

【例 10-4】 用刀具长度补偿指令编写图 10-14 所示的钻孔程序，设刀具长度基准在主轴端面中心，刀具长度为 25mm。

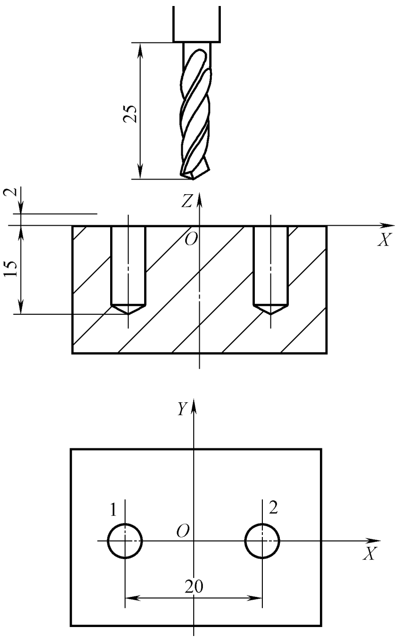


图 10-14　刀具长度补偿应用举例

刀具长度补偿 H01 设定为 25。

加工程序：

O1002;	
G54 G17 G90 G00 X0 Y0 Z35.0；	设定工件坐标系和加工平面，刀具快速定位到加工起点
M03 S600；	
X−10.0；	刀具快速定位到 1 孔上方
G44 Z2.0 H01；	建立刀具长度补偿，刀具快移到 1 孔上方 2mm 处
G01 Z−15 F80；	钻 1 孔到规定深度
G00 Z2.0；	刀具快速退回到 1 孔上方 2mm 处
X10.0；	刀具快速定位到 2 孔上方
G01 Z−15.0；	钻 2 孔到规定深度
G49 G00 Z80.0；	刀具长度补偿撤销，快速退回到起点平面
X0 Y0；	快速返回加工起点
M05；	
M30；	

3. 刀具半径和长度测量

刀具要进行半径补偿和长度补偿，必须先测量刀具的实际半径和长度。在数控加工过程

中，刀具测量对加工质量和加工效率有很大的影响，刀具测量有离线测量和在线测量两种方式。机外对刀仪是加工中心必须配备的一个辅助设备，如图 10-15 所示。

被测刀具 1 的刀柄插入操作台的锥孔中，转动调节手轮 7，使光学对刀系统 4 沿 X 轴和 Z 轴方向移动，当光学显示屏 2 中的十字线对准刀尖时，显示器上显示刀具长度和半径，同时打印出测量数据；将每把刀具的长度、半径等数据输入到数控系统的刀具管理数据库中，当选择了某把刀具时，则该把刀具的长度、半径等数据也就生效了。先进的机外对刀仪有专门的测量和通信软件，通过对刀具的直径、长度、角度和磨损量等进行测量，将数据经 RS232 串行通信或网络传送给数控系统。

10.1.4　刀具半径补偿的应用

1. 刀具半径补偿用于零件轮廓粗、精加工

用同一形状、同一尺寸的刀具，利用刀具半径补偿进行粗、精加工，如图 10-16 所示。

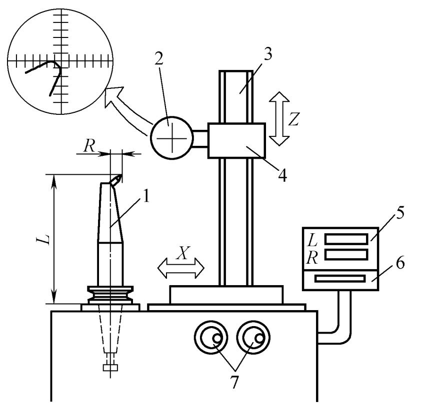


图 10-15　机外对刀仪

1—被测刀具　2—光学显示屏　3—立柱　4—光学对刀系统（滑座）　5—测量数据显示　6—打印机　7—调节手轮

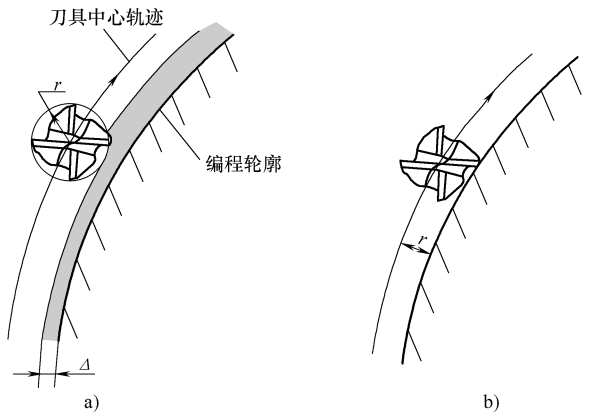


图 10-16　刀具半径补偿用于轮廓粗、精加工

a）粗加工　b）精加工

设刀具半径为 r，精加工余量为 Δ。粗加工时，半径补偿值设定为（$r+\Delta$），此时，刀具中心轨迹如图 10-16a 所示；精加工时，半径补偿值设定为 r，则刀具中心轨迹如图 10-16b 所示。基于同样的原理，刀具半径补偿还可以用来进行零件轮廓尺寸精度的控制。

2. 刀具中心偏置

有些铣削零件编程轮廓与加工轮廓形状相同，但加工轮廓偏移编程轮廓一个距离，如图 10-17 所示，L 为轮廓偏移距离，r 为刀具半径。设定刀具半径补偿值为（$L+r$），则刀具中心轨迹偏移编程轮廓（$L+r$）距离。

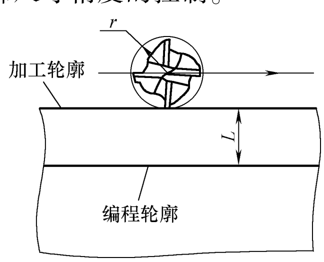


图 10-17　刀具中心偏置

10.1.5　数控铣削编程实例

1. 平面铣削

数控平面铣削通常采用面铣刀进行切削，根据工件宽度、刀具直径和加工要求来选择加工路径。当工件宽度较窄时，铣刀可一次切削完成，如图 10-18a 所示；当工件较宽，铣刀

直径不足以一次切削时，应采用多次切削方式，包括双向多次切削和单向多次切削，如图10-18b、c所示。

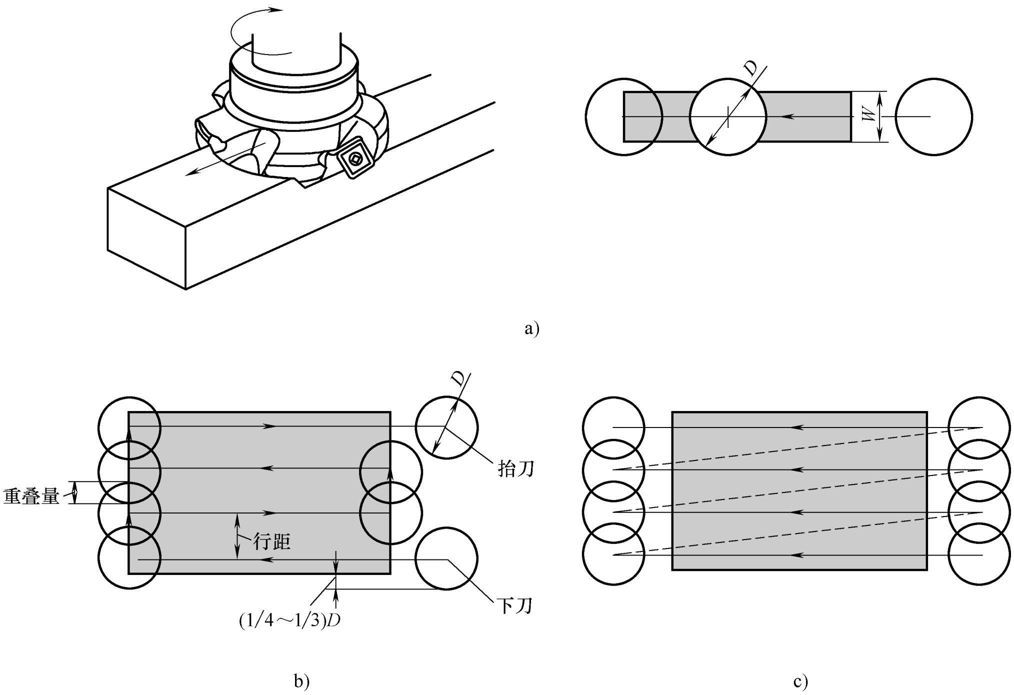


图 10-18　平面铣削路径

a）一刀式切削　b）双向多次切削　c）单向多次切削

一刀式切削中，刀具直径 D 为工件宽度 W 的 1.3~1.5 倍；双向多次切削中，刀具来回重复切削（称为行切），顺铣和逆铣交替进行，刀具在平面上始终处于切削状态，切削效率高，适用于粗加工。其中，第一次切入和最后一次切出时，刀具边缘与工件边缘之间的距离为(1/4~1/3)D，考虑到来回行切区域的重叠量，行距为 $3D/4$；单向多次切削中，刀具单方向切削到切出点，抬刀后快退到下一次的切入点，下刀后再继续单方向切削，以此重复；单向多次切削过程中，刀具保持顺铣或逆铣切削状态不变，适用于精加工。

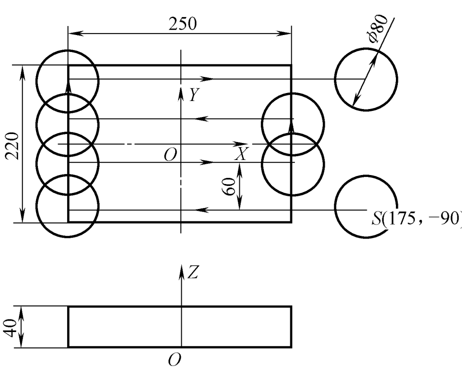


图 10-19　平面铣削举例

【例 10-5】　对图 10-19 所示工件上表面进行双向多次切削，面铣刀直径为 ϕ80mm，工件坐标系在工件底面中心。

设定行距为 60mm，重复次数为 4 次，加工起点坐标 S(175，−90)。

加工程序：

O1003；

G54 G17 G90 G00 X0 Y0 Z200.0；

```
M03 S300;
X175.0 Y-90.0;            刀具定位到 S
Z50.0;
G01 Z40.0 F100;           Z 方向下刀
G91 X-300.0 F400;         -X 方向铣削，第 1 次行切
Y60.0;                    +Y 方向进刀
X250.0;                   +X 方向铣削，第 2 次行切
Y60.0;                    +Y 方向进刀
X-250.0;                  -X 方向铣削，第 3 次行切
Y60.0;                    +Y 方向进刀
X300.0;                   +X 方向铣削，第 4 次行切
G90 G00 Z50.0;            Z 方向抬刀
M30;
```

2. 平面轮廓铣削

平面轮廓有外轮廓和内轮廓，形状有封闭型和开放型，切削刀具为立铣刀。

（1）刀具半径选择　内、外轮廓都有可能存在内、外拐角，如图 10-20 所示。铣刀半径应等于或小于轮廓内拐角最小曲率半径，以避免过切。

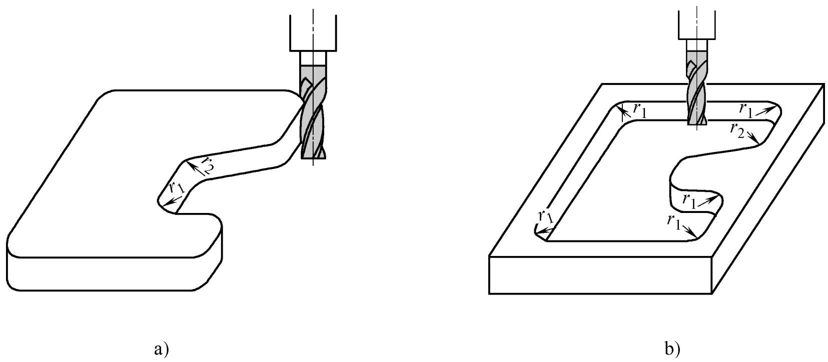


图 10-20　平面轮廓铣削

a）外轮廓　b）内轮廓

r_1，r_2—内拐角曲率半径

（2）切入、切出工艺处理　在铣削内、外轮廓时，如果铣刀从对刀点开始直接切入到零件表面，轮廓铣削后再从切入处直接切出，则由于铣刀在轮廓切入、切出点停留时间较长，会在该点产生明显的刀痕，如图 10-21a 所示。为避免产生刀痕，可采用切向切入、切出的方法，如图 10-21b、c 所示。

切向切入、切出必须设置辅助轮廓，其中直线过渡切向切入、切出适用于外轮廓；圆弧过渡切向切入、切出适用于外轮廓和内轮廓，切入、切出内轮廓时，过渡圆弧半径要小于轮廓过渡处的曲率半径。

【例 10-6】　用 ϕ12mm 立铣刀铣削图 10-22 所示的凸轮。零件毛坯通过垫块安装在工作台上，并通过零件上的 ϕ20mm 定位孔用带螺纹的短圆柱经压板和螺母夹紧，工件坐标系原

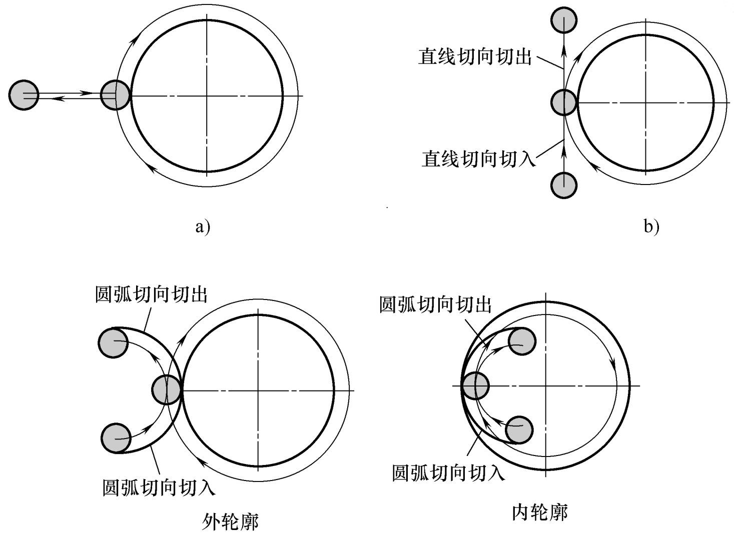


图 10-21　轮廓铣削切入、切出

a）直接切入、切出　b）直线过渡切向切入、切出　c）圆弧过渡切向切入、切出

点设定在工件表面 ϕ20mm 定位孔中心位置。切削用量：主轴转速为 600r/min，进给速度为 200mm/min。

经计算，零件轮廓坐标值为：A(0，50)、B(0，-50)、C(18.856，-36.667)、D(28.284，-10)、E(28.284，10)、F(18.856，36.667)。刀具起点在 S，经直线切向切入到零件轮廓 A 点后进行轮廓铣削，铣削结束后再由 A 点经直线切向切出到 G 点。

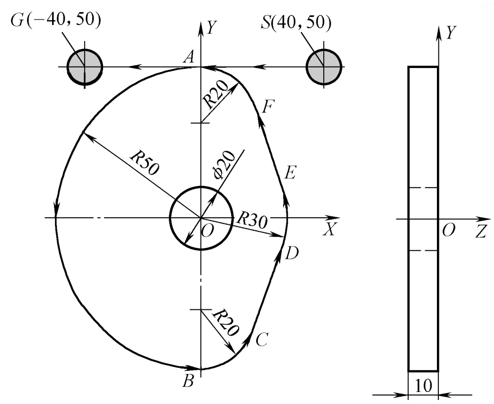


图 10-22　平面凸轮铣削

刀具半径补偿 D01=6，刀具长度补偿 H01=100。

加工程序：

```
O1004;
G54 G17 G90 G00 X40.0 Y50.0 Z150.0;      刀具快速定位到加工起点 S
S600 M03;
M08;                                      切削液开
G44 Z-12.0 H01;                           刀具长度补偿，Z 方向进刀
G01 G42 X0 Y50.0 D01 F200;                刀具半径右补偿，刀具从 S 点直线切
                                          向切入到 A 点
G03 Y-50.0 R50.0;                         圆弧 R50 切削，A→B
X18.856 Y-36.667 R20.0;                   圆弧 R20 切削，B→C
G01 X28.284 Y-10.0;                       直线切削，C→D
```

G03 X28.284 Y10.0 R30.0；	圆弧 $R30$ 切削，$D \rightarrow E$
G01 X18.856 Y36.667；	直线切削，$E \rightarrow F$
G03 X0 Y50.0 R20.0；	圆弧 $R20$ 切削，$F \rightarrow A$
G01 X-40.0 M09；	刀具从 A 点直线切向切出到 G 点，切削液关
G49 G00 Z150.0；	刀具 Z 方向退刀，刀具长度补偿撤销
G40 X40.0 Y50.0；	刀具半径补偿撤销，返回加工起点
M05；	
M30；	

【例 10-7】 用 ϕ8mm 立铣刀铣削图 10-23 所示的内轮廓面，工件坐标系 G54 设定在工件表面中心。

内轮廓切入、切出点在 A 点，采用圆弧过渡切向、切出的方式，辅助轮廓如图中圆弧 P_1A 和 AP_2 所示。根据零件尺寸，得到轮廓切点及圆弧圆心坐标如下：

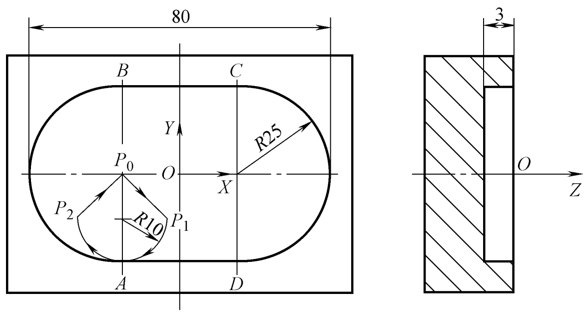


图 10-23　内轮廓铣削

A(—15，—25)、B(-15，25)、C(15，25)、D(15，-25)、P_0(-15，0)、P_1(—5，—15)、P_2(—25，—15)。

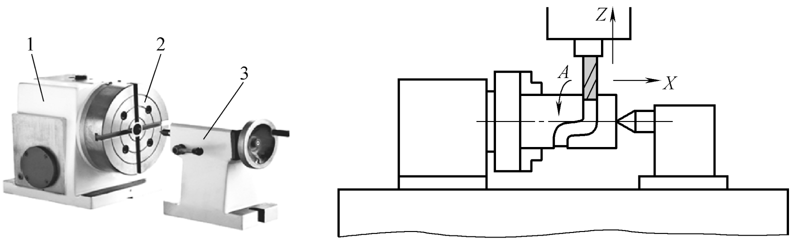
设定刀具半径补偿 D02=4；刀具长度为 20mm，长度方向以主轴端面中心为基准，长度补偿 H02=20。

加工程序：

O1005；	
G54 G17 G90 G00 X0 Y0 Z30；	设定工件坐标系和加工平面，刀具快速定位到加工起点
S600 M03；	
X-15.0 Y0；	快移至 P_0 点
G44 G01 Z-3.0 H02 F80；	刀具长度补偿，Z 方向进刀，槽深 3mm
G42 G01 X —5.0 Y —15.0 D02 F150；	$P_0 \rightarrow P_1$，刀具半径右补偿
G02 X —15.0 Y —25.0 R10.0；	$P_1 \rightarrow A$，圆弧切向切入
Y25.0 R25.0；	$A \rightarrow B$
G01 X15.0；	$B \rightarrow C$
G02 X-25.0 R25.0；	$C \rightarrow D$
G01 X-15.0；	$D \rightarrow A$
G02 X —25.0 Y —15.0 R10.0；	$A \rightarrow P_2$，圆弧切向切出
G40 G01 X-15.0 Y0；	$P_2 \rightarrow P_0$，撤销刀具半径补偿
G49 G00 Z30.0；	撤销刀具长度补偿，刀具 Z 方向退刀
X0 Y0；	刀具快速返回对刀点
M05；	
M30；	

3. 圆柱凸轮槽铣削

圆柱凸轮槽是环绕在圆柱面上的等宽槽，适合在带有数控转台的立式数控铣床上进行加工，如图 10-24 所示。



a)　　b)

图 10-24　数控转台用于圆柱凸轮槽加工

a）数控转台组成　b）圆柱凸轮槽加工示意图

1—第 4 轴伺服动力头　2—卡盘　3—尾座

数控转台作为回转轴（*A* 轴）安装在工作台上，加工时沿圆周表面铣削的范围往往大于 360°。圆柱凸轮槽是一条空间曲线，将圆柱凸轮槽展开成平面（图 10-25），就可以按平面轮廓程序编制的方法对其编写加工程序。数控系统通过 *X* 轴和 *A* 轴插补联动，实现空间曲线的加工。

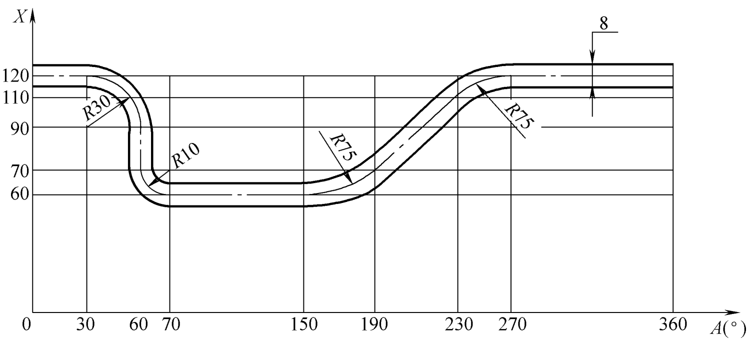


图 10-25　圆柱凸轮槽展开剖面图

【例 10-8】　用 ϕ8mm 立铣刀铣削图 10-25 所示的圆柱凸轮槽，按刀具中心轨迹编程。

加工程序：

```
O1006;
G90 G00 X120.0 A0 Z20.0;
M03 S800;
G01 Z-3.0 F100;
A30.0 F200;
G02 X90.0 A60.0 R30.0;
G01 X70.0;
G03 X60.0 A70.0 R10.0;
G01 A150.0;
```

G03 X70.0 A190.0 R75.0；

G01 X110.0 A230.0；

G02 X120.0 A270.0 R75.0；

G01 A360.0；

M05；

M30；

对于槽宽大于刀具直径的铣削加工，可以采用刀具半径补偿功能分别对槽的两壁进行切削加工。

10.1.6　型腔固定循环指令

型腔加工是数控铣床常见的一个切削项目，型腔从无到有、从小到大要经历多次重复切削，型腔切削有矩形型腔和圆形型腔固定循环指令。

1. 矩形型腔固定循环指令 G87

矩形型腔采用分层环形切削，即当前层切削时，刀具从型腔中心开始进行矩形路径的切削，每切完一层，刀具轴向退出1mm后再快速退到型腔中心，然后轴向进刀进行下一层切削，如此重复，一直到给定的型腔深度，最后沿型腔壁进行精加工切削。矩形型腔固定循环指令 G87 刀具轨迹及参数如图 10-26 所示。

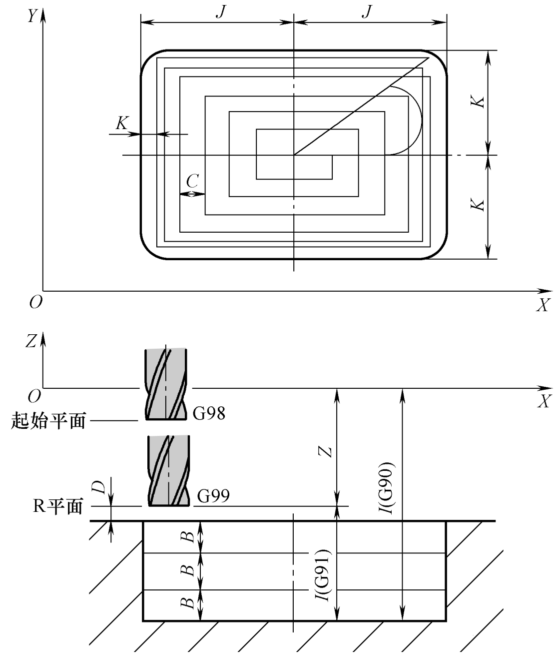


图 10-26　矩形型腔固定循环指令 G87 刀具轨迹及参数

指令格式：

$$G87\begin{Bmatrix}G98\\G90\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G00\\G01\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}X_\ Y_\ Z_\ J_\ K_\ B_\ C_\ H_\ L_\ N_\ F_;$$

G80；

其中：

G80：撤销 G87 指令。

G98/G99：G98 指定刀具切削完成后轴向退到起始平面，G99 指定刀具切削完成后轴向退到 R 平面。

X、Y：矩形槽对称中心坐标，用 G90 时为绝对值坐标，用 G91 时为增量值坐标；编入 G00 时，刀具快速移动到对称中心，编入 G01 时，刀具以进给速度移动到对称中心。

I：定义槽深度，编入 G90 时，I 为绝对值；编入 G91 时，I 为以 R 平面为基准的增量值。

J：加工平面为 G17 时，对称中心沿 *X* 轴到型腔边缘的距离，正、负号决定铣削走向。

K：加工平面为 G17 时，对称中心沿 *Y* 轴到型腔边缘的距离，无正、负号。

B：型腔每层切削深度。

C：刀具中心行距，无正、负号。若未编入 C，则系统自动取刀具半径的 3/4。

D：R 平面与工件表面之间的距离。

H：最后精切时的进给速度。

L：最后精切的余量，L 为正表示切入、切出时为方角过渡，为负则表示圆弧过渡。

N：本程序执行的次数，用 G91 编程时使用。

F：环切时的进给速度。

例如：矩形型腔尺寸为 105mm×75mm，深 40mm，铣刀直径为 ϕ15mm。型腔对称中心 *X* 方向距工件坐标系原点为 90mm，*Y* 方向为 60mm，工件表面 *Z* 方向距工件坐标系原点为 -50mm。设置：R 平面与工件表面之间的距离为 2mm，刀具中心行距为 10mm，型腔每层切削深度为 12mm；加工起点在工件坐标系原点，切削完成后刀具退到加工起点，精切进给速度为 100mm/min，环切进给速度为 300mm/min，主轴转速为 1000r/min。该矩形槽 G87 指令程序为：

N10 G87 G98 G00 G90 X90.0 Y60.0 Z-48.0 I-90.0 J52.5 K37.5 B12.0 C10.0 D2.0 H100 L5.0 F300 S1000 M03；

N20 G80 X0 Y0；

N30 M30；

2. 圆形型腔固定循环指令 G88

圆形型腔固定循环也采用分层环形切削，G88 指令中，J 定义为圆形型腔半径，K 省略，其他参数与 G87 指令相同。

FANUC 系统还有几种特制的编程指令，如图形比例、坐标轴旋转、镜像功能及极坐标编程等，读者可参考有关资料。

10.2 孔加工固定循环指令及子程序

10.2.1 固定循环

机械加工中，孔加工刀具分为两类，一类是在实体工件上加工出孔的刀具，如麻花钻、中心钻等；另一类是对工件上已有孔进行再加工的刀具，如扩孔钻、锪孔钻、铰刀及镗刀等。根据加工工艺，每一种孔加工都有规定的步骤，将这些步骤用一条指令来表示即为固定循环指令。以普通钻孔过程为例，如图 10-27 所示，钻孔要经历三个过程，即钻头快速移动到 R 平面→钻头工进钻削到孔底→钻头快速退回。

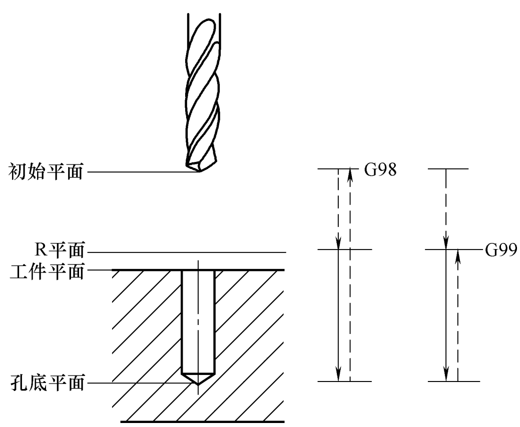


图 10-27 普通钻孔过程

若按常规的编程方法，钻孔过程至少要用到三个指令，即 G00→G01→G00，若加工的孔很多，则程序会变得冗长。孔加工固定循环就是用一条指令完成孔的加工过程，程

序简洁明了。根据各种孔有不同的工艺要求，与之对应的有 G81～G89 固定循环指令。

1. 钻孔循环指令 G81

G81 指令适用于普通孔的钻削加工，包括孔的定位、快进、工进和快退过程，如图 10-27所示。

指令格式：

$\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G98\\G99\end{Bmatrix}$ G81 X __ Y __ Z __ R __ F __；

其中：

G98 指令：刀具快速退至初始平面。

G99 指令：刀具快速退至 R 平面。

X、Y：孔中心在工件坐标系中的绝对坐标值或相对坐标值，由 G90 和 G91 指令指定。

Z：孔深度在工件坐标系中的绝对坐标值或相对坐标值，由 G90 和 G91 指令指定。

R：R 平面与工件表面之间的距离，一般取 2～5mm。

F：钻孔进给速度，一般用 mm/min。

G81～G89 指令由 G80 指令撤销。

【例 10-9】 用 ϕ10mm 钻头钻削图 10-28 所示的孔。设定刀具长度补偿 H03＝80。

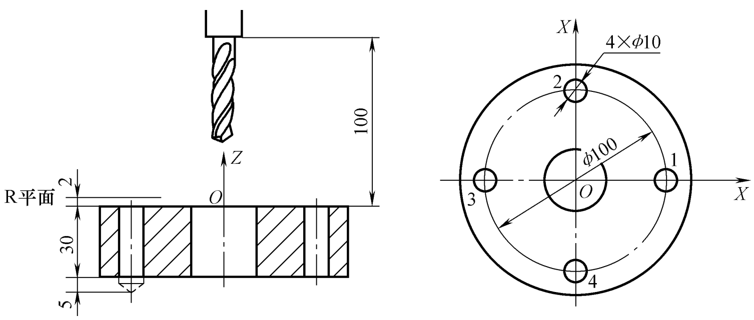


图 10-28　G81 指令应用举例

加工程序：

O1007；	
G54 G17 G90 G00 X0 Y0 Z100.0；	设定工件坐标系和加工平面，刀具快速定位到加工起点
M03 S800；	
G44 Z2.0 H01；	刀具长度补偿，刀具 Z 方向快移到 R 平面
G99 G81 X50.0 Y0 Z-30.5 R2.0 F100；	钻 1 孔后快退至 R 平面
X0 Y50.0；	钻 2 孔
X-50.0 Y0；	钻 3 孔
X0 Y-50.0；	钻 4 孔
G80 G49 Z100.0；	撤销固定循环和刀具长度补偿
X0 Y0；	快退至加工起点
M05；	
M30；	

2. 钻孔循环指令 G82

G82 指令的钻孔过程与 G81 指令相同，只是刀具进给到孔底后有一定的停留时间，以便断屑和改善孔底的表面粗糙度。G82 指令常用于倒角和锪孔等场合，其加工轨迹如图 10-29所示。

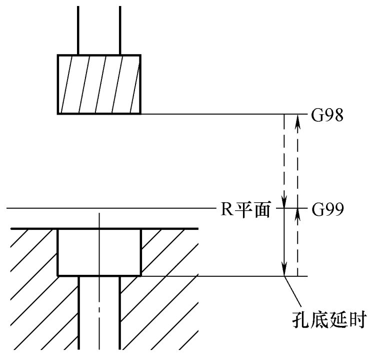


图 10-29　G82 指令加工轨迹

指令格式：

$\left\{\begin{matrix}G90\\G91\end{matrix}\right\}$ $\left\{\begin{matrix}G98\\G99\end{matrix}\right\}$ G82 X __ Y __ Z __ R __ P __ F __;

（P：暂停时间，用整数表示，以 ms 为单位）

3. 深孔排屑钻循环指令 G83

G83 指令适用于钻削长径比大于 10 的深孔。钻孔时，每钻削一定深度即快速退回至 R 平面，以便进行断屑并使切屑顺利排出，防止切屑堵塞；以此重复直至加工到孔底。G83 指令加工轨迹如图 10-30 所示。

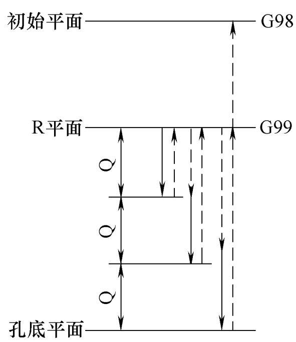


图 10-30　G83 指令加工轨迹

指令格式：

$\left\{\begin{matrix}G90\\G91\end{matrix}\right\}$ $\left\{\begin{matrix}G98\\G99\end{matrix}\right\}$ G82 X __ Y __ Z __ R __ Q __ F __;

（Q：每次钻削深度，为增量值，必须是正值）

4. 攻螺纹循环指令 G84

G84 指令适用于机用丝锥加工内螺纹。加工时，主轴正转使丝锥攻螺纹到规定深度，主轴停止后再反转使丝锥退出。G84 指令加工轨迹如图 10-31 所示。

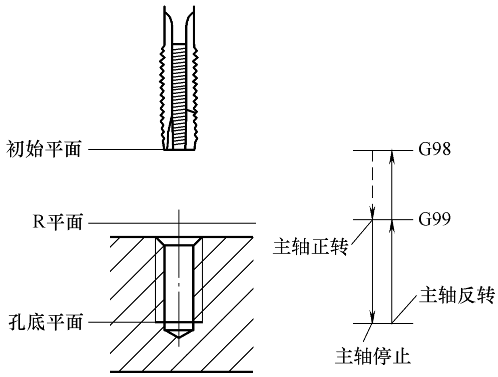


图 10-31 G84 指令加工轨迹

指令格式：

$\begin{Bmatrix}G90\\G91\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}G98\\G99\end{Bmatrix}$ G84 __ X __ Y __ Z __ R __ F __；

其他 G85~G89 镗削循环指令请读者参见有关资料。

10.2.2 子程序

加工程序中，当部分运动轨迹重复出现时，可把这部分轨迹编制成子程序，主程序根据加工要求调用子程序，这样可使主程序简洁，且层次清楚。主程序与子程序之间的关系如图 10-32 所示。

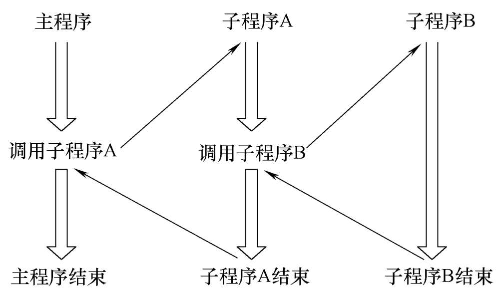


图 10-32 主程序与子程序之间的关系

子程序可以由主程序调用，已被调用的子程序还可以调用其他子程序，这种方式称为子程序嵌套，嵌套的次数由数控系统规定。

1. 子程序调用格式

M98 P ×××× L××；

L××——重复调用子程序的次数，如 1 次可省略

P××××——被调用的子程序号

2. 子程序格式

O ××××；

O××××——子程序号

·
·
·
——子程序内容

M99；子程序结束指令，返回上一级程序

【例 10-10】 用 ϕ20mm 立铣刀加工图 10-33 所示零件的外轮廓，要求每次背吃刀量不大于 20mm。

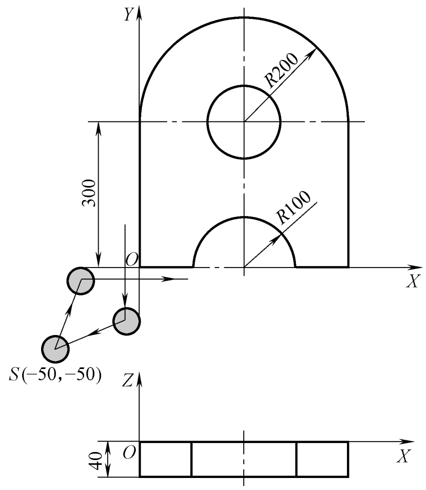


图 10-33　子程序应用举例

根据零件厚度，分 2 次切削。在 2 次切深过程中，刀具在 *XOY* 平面上的轨迹完全一致，可以将刀具轨迹编写成子程序，通过主程序 2 次调用该子程序完成零件的加工。工件坐标系原点设置如图 10-33 中所示，*S* 为加工起点。

加工程序：

O1008；	主程序号
G54 G17 G90 G00 X — 50. 0 Y — 50. 0 Z300. 0；	
M03 S600；	
G01 Z-20. 0 F150；	*Z* 方向第 1 次切深，背吃刀量为 20mm
M98 P1009；	第 1 次调用子程序 O1009
G01 Z-45. 0 F150；	*Z* 方向第 2 次切深，背吃刀量为 45mm
M98 P1009；	第 2 次调用子程序 O1009
G00 Z300. 0；	
M30；	主程序结束
O1009；	子程序号
G01 G42 X-30. 0 Y0 D01 F300；	
M08；	
X100. 0；	
G02 X300. 0 R100. 0；	
G01 X400. 0 ；	
Y300. 0；	
G03 X0 Y300. 0 R200. 0；	
G01 Y-30. 0；	
G01 G40 X — 50. 0 Y — 50. 0；	
M09；	
M99；	子程序结束并返回主程序

10.3　加工中心程序

加工中心是具有刀库和换刀功能的数控铣镗床，工件一次装夹可完成铣、钻、铰、扩、攻螺纹、镗等多工步加工，减小了装夹定位误差，提高了加工效率。加工中心程序综合了铣削程序、孔加工固定循环指令以及子程序等，适用于箱壳体、盘盖等零件的加工。

10.3.1　换刀

加工中心在加工时，每工步结束后都要进行换刀动作，以便后续工步进行加工。换刀包括刀库选刀和刀具交换两个步骤，选刀指令为 T××，××为目标刀具号，该指令的作用就是将刀库中的目标刀具转到换刀位置；刀具交换指令为 M06，其作用就是主轴回换刀点并准停，将刀库已选择的目标刀具装入主轴中，并把主轴中的刀具放回刀库中。对斗笠式刀库，因采用绝对位置选刀控制，选刀和换刀可同时进行，指令格式：

T×× M06；

例如：执行 T03 M06 指令后，主轴、刀库及换刀机械手经过一系列的动作后将目标刀具 T03 装入主轴中。

对回转式刀库，因采用随机换刀控制，选刀和换刀可分开进行，即先选刀后换刀，这样做的好处是，在当前工步进行加工的同时，下一工步的刀具已在刀库中选择好，等当前工步完成时直接换刀，节省了换刀时间。指令格式：

```
T××;
 └──刀库选择下一工步所需刀具，等待换刀
 ·
 ·  } 当前工步加工内容
 ·
M06;   机械手换刀
 ·
 ·  } 下一工步加工内容
 ·
```

10.3.2　加工中心编程实例

图 10-34 所示为壳体零件，在立式加工中心上加工工件上表面、环形槽及 4×M10 螺纹。

1. 装夹定位

工件底面为第一定位基准，定位元件为支承板；$\phi80^{+0.046}_{0}$mm 孔为第二定位基准，定位元件采用带螺纹的短圆柱销，通过压板和螺母从定位孔的上端面往下将工件压紧；工件的后侧面为第三定位基准，定位元件采用移动定位板。

2. 刀具及切削参数

工件上表面根据加工宽度，选用 ϕ80mm 硬质合金面铣刀一次进给加工完成；环形槽选用 ϕ10mm 高速钢立铣刀直接铣削完成；4 个 M10 螺纹孔分别由中心钻、麻花钻、倒角钻和机用丝锥加工完成。各刀具规格和切削参数见表 10-1。

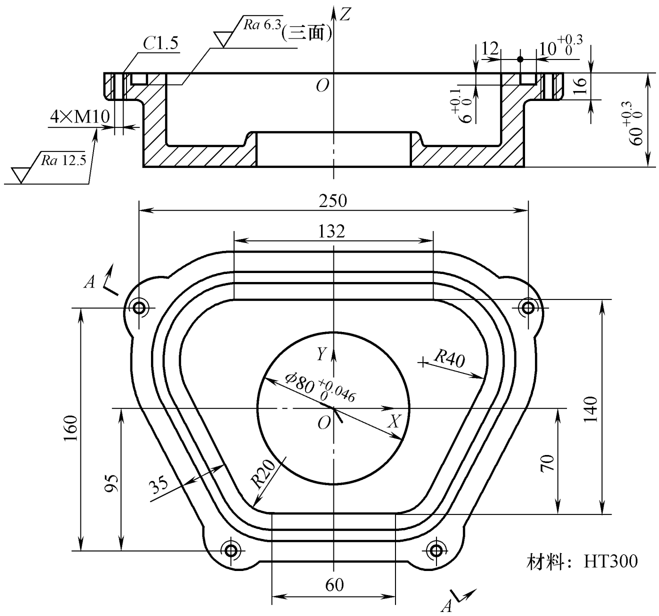
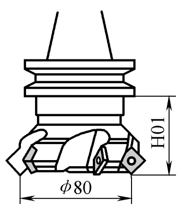
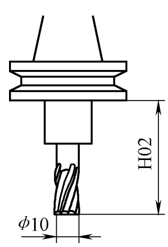
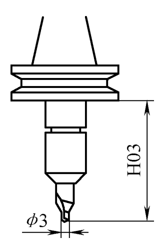
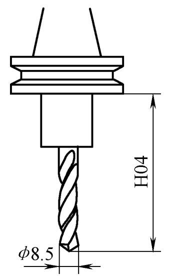
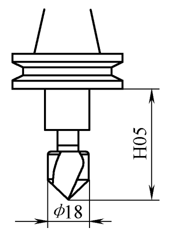
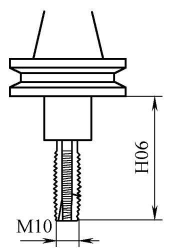


图 10-34　壳体零件

表 10-1　刀具规格和切削参数

刀具名称	刀具号	简图	加工对象	主轴转速 /(r/min)	进给速度 /(mm/min)	半径补偿地址	长度补偿地址
ϕ80mm 硬质合金面铣刀	T01		铣上表面	300	60	D01	H01
ϕ10mm 高速钢立铣刀	T02		铣环形槽	300	30	D02	H02
ϕ3mm 中心钻	T03		钻 4×M10 的中心孔	1000	60		H03

（续）

刀具名称	刀具号	简图	加工对象	主轴转速 /（r/min）	进给速度 /（mm/min）	半径补偿地址	长度补偿地址
ϕ8. 5mm 麻花钻	T04		钻 4×M10 螺纹底孔	500	50		H04
90°ϕ18mm 倒角钻	T05		4×M10 底孔孔口倒角	500	50		H05
M10 机用丝锥	T06		攻 4×M10 螺纹	60	50		H06

3. 刀具路径规划

（1）上表面和环形槽切削　用面铣刀加工上表面的铣削轨迹和用立铣刀加工环形槽的铣削轨迹均以相同的零件轮廓为编程依据，如图 10-35 所示。轮廓轨迹作为一个子程序，分别在铣上表面和环形槽时由主程序调用。

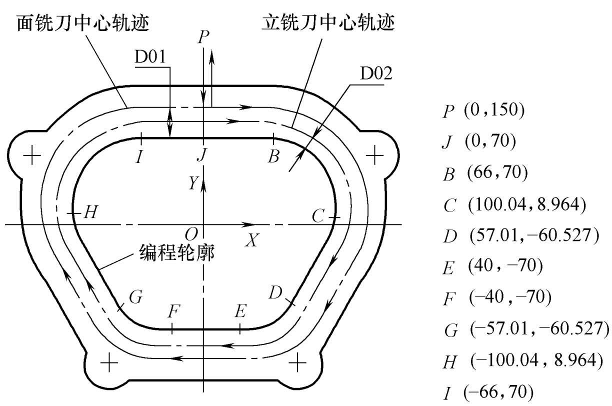


图 10-35　铣上表面和环形槽刀具轨迹及坐标

铣上表面时，根据上表面最大宽度，采用 ϕ80mm 面铣刀铣削加工完成，刀具中心偏移编程轮廓 30mm，故 D01 设定为 30；铣环形槽时，采用 ϕ10mm 立铣刀一次铣削成环形，因为槽内侧面偏移编程轮廓 12mm，刀具直径为 10mm，所以刀具中心偏移编程轮廓 17mm，故 D02 设定为 17。*P* 为铣上表面和环形槽的加工起点。

（2）4×M10 螺纹　加工 4×M10 螺纹要经历四个工步，每个工步刀具对四个孔的定位轨迹是一样的，如图 10-36 所示。定位轨迹作为另一个子程序，分别在钻中心孔、钻底孔、倒角和攻螺纹时由主程序调用。

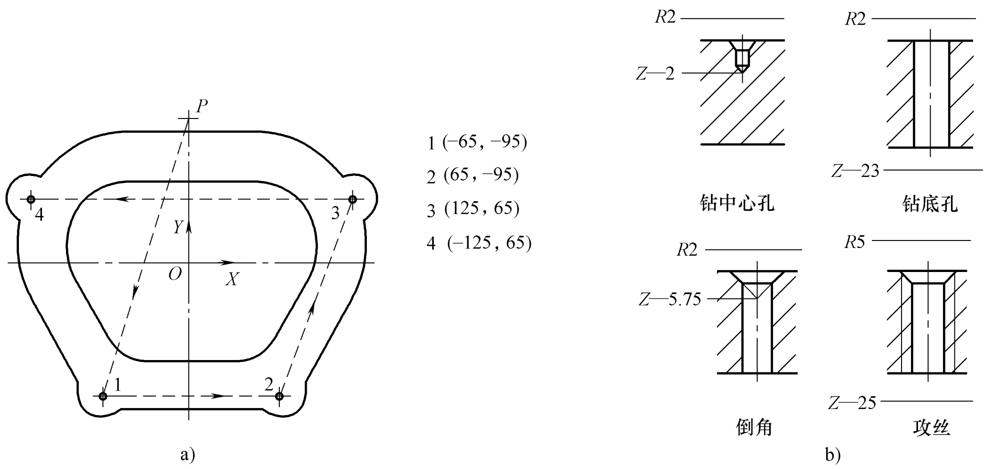


图 10-36　孔加工

a）孔定位轨迹及坐标　b）螺纹加工过程及参数

4. 加工顺序

根据先面后孔、先简单后复杂的原则，先进行平面铣削，后安排孔和槽的加工。具体加工步骤如下：

工步 1：铣上表面。

工步 2：钻 4×M10 螺纹孔的中心孔。

工步 3：钻 4×M10 螺纹底孔。

工步 4：4×M10 螺纹底孔孔口倒角。

工步 5：攻 4×M10 螺纹。

工步 6：铣环形槽。

5. 加工程序

以工件设计基准为工件坐标系原点，即以 $\phi80^{+0.046}_{0}$mm 孔中心线与工件上表面交点为编程原点。

主程序：

O1010；

G54 G90 G17 G00 G40 G49 G80；

T01 M06；　　主轴准停并到换刀点，换 T01 刀（ϕ80mm 面铣刀）

G00 X0 Y150.0；　　快速定位到 *P* 点

G43 Z2.0 H01 S300 M03；　　刀具长度补偿 H01，主轴正转

G01 Z0 F60；	*Z* 轴进刀到上表面
G41 G01 Y70.0 D01；	直线切入工件，建立刀具半径左补偿 D01 到 *J* 点
M98 P0010；	调用子程序 O0010，铣削工件上表面
G40 X0 Y150.0；	撤销刀具半径补偿，回到 *P* 点
G00 Z20.0；	*Z* 轴快速回到安全高度
G49 Z200.0；	撤销刀具长度补偿
T03 M06；	主轴准停并回换刀点，换 T03 刀（ϕ3mm 中心钻）
G00 X－65.0 Y－95.0；	快速定位到 1 号孔上方
G43 Z20.0 H03 S1000 M03；	刀具长度补偿，到安全高度
G99 G81 Z-2.0 R2.0 F60；	钻孔循环，钻 4×M10 第 1 个中心孔
M98 P0020 ；	调用 O0020 子程序，钻其余 3 个中心孔
G80 G00 Z20.0；	取消钻孔循环，到安全高度
G49 Z200.0；	取消刀具长度补偿
T04 M06；	主轴准停并回换刀点，换 T04 刀（ϕ8.5mm 麻花钻）
G00 X－65.0 Y－95.0；	快速定位到 1 孔上方
G43 Z20.0 H04 S1000 M03；	刀具长度补偿，到安全高度
G99 G81 Z-23.0 R2.0 F50；	钻孔循环，钻 4×M10 第 1 个底孔
M98 P0020；	调用 O0020 子程序，钻其余 3 个底孔
G80 G00 Z20.0；	取消钻孔循环，到安全高度
G49 Z200.0；	取消刀具长度补偿
T05 M06；	主轴准停并回换刀点，换 T05 刀（90°ϕ18mm 倒角钻）
G00 X－65.0 Y－95.0；	快速定位到 1 号孔上方
G43 Z20.0 H05 S500 M03；	刀具长度补偿，到安全高度
G99 G82 Z-5.75 R2.0 P1000 F50；	钻孔循环，第 1 个底孔倒角
M98 P0020；	调用 O0020 子程序，其余 3 个底孔倒角
G80 G00 Z20.0；	取消钻孔循环，到安全高度
G49 Z200.0；	取消刀具长度补偿
T06 M06；	主轴准停并回换刀点，换 T06 刀（M10 机用丝锥）
G00 X－65.0 Y－95.0；	快速定位到 1 号孔上方
G43 Z20.0 H06 S60 M03；	刀具长度补偿，到安全高度
G99 G84 Z-25.0 R5.0 F50；	攻螺纹循环，攻 4×M10 第 1 个螺纹
M98 P0020；	调用 O0020 子程序，其余 3 个底孔倒角
G80 G00 Z20.0；	取消钻孔循环，到安全高度
G49 Z200.0；	取消刀具长度补偿
T02 M06；	主轴准停并回换刀点，换 T02 刀（ϕ10mm 高速钢立铣刀）
G00 X0 Y150.0；	快速定位到 *P* 点
G43 Z2.0 H02 S300 M03；	刀具长度补偿 H02，*Z* 轴到工件上表面 2mm

G41 G00 Y70.0 D02;	刀具半径左补偿 D02 建立到 *J* 点，刀具中心移动到环形槽中心线上
G01 Z-6.0 F30;	槽切深 6mm
M98 P0010;	调用子程序 O0010，铣削环形槽
G00 Z20.0;	*Z* 方向退刀到安全高度
G40 X0 Y150.0;	撤销刀具半径补偿，回到 *P* 点
G49 Z200.0;	撤销刀具长度补偿
X0 Y0;	
M05;	
M30;	主程序结束
子程序：	
O0010;	轮廓轨迹子程序
X66.0 Y70.0;	直线 *J*→*B*
G02 X100.04 Y8.964 R40.0;	圆弧 *B*→*C*
G01 X57.01 Y-60.527;	直线 *C*→*D*
G02 X40.0 Y-70.0 R20.0;	圆弧 *D*→*E*
G01 X-40.0;	直线 *E*→*F*
G02 X-57.01 Y-60.527 R40.0;	圆弧 *F*→*G*
G01 X-100.04 Y8.964;	直线 *G*→*H*
G02 X-66.0 Y70.0 R40.0;	圆弧 *H*→*I*
G01 X0.5;	直线 *H*→*J*（刀具中心右偏移 *J* 点 0.5mm，避免残留刀痕）
M99;	子程序结束，返回主程序 O0020
O0020;	孔定位子程序
X65.0;	2 号孔位置
X125.0 Y65.0;	3 号孔位置
X-125.0;	4 号孔位置
M99;	子程序结束，返回主程序 O1010

思考题与习题

1. 根据如下的铣削加工程序，试画出零件轮廓形状并标注尺寸。

```
O1011;
G54 G17 G90 G00 X0 Y-20.0 Z10.0;
S1000 M03;
Z3.0;
G01 Z-3.0 F100;
G41 X20.0 Y5.0 D01;
Y70.0;
```

```
G02 X40.0 Y90.0 R20.0;
G01 X100.0;
G03 X120.0 Y70.0 R20.0;
G01 Y30.0;
X100.0 Y10.0;
X10.0;
G40 X0 Y-20.0;
G01 Z3.0;
G00 Z10.0;
M05;
M30;
```

2. 某零件轮廓形状及尺寸如图10-37所示，用ϕ8mm立铣刀进行轮廓铣削。深度方向采用分层铣削，粗铣分2层，精铣不分层；精铣余量为0.2mm。要求用子程序调用方式，并考虑刀具半径补偿。切削参数如下：

粗铣：相对于*Z*零平面，第1次背吃刀量为12mm，第2次背吃刀量为23mm，主轴转速为600r/min，进给量为100mm/min，刀具半径补偿号为D01。

精铣：背吃刀量为27mm，主轴转速为1000r/min，进给量为60mm/min，刀具半径补偿号为D02。

工件坐标系设定如图10-37中所示，对刀点为（0，0，50），*A*为切入开始点，*B*为切出结束点。

3. 编写图10-38所示的4×M10螺纹孔加工程序。刀具规格和切削参数的选择参考表10-1中的内容。

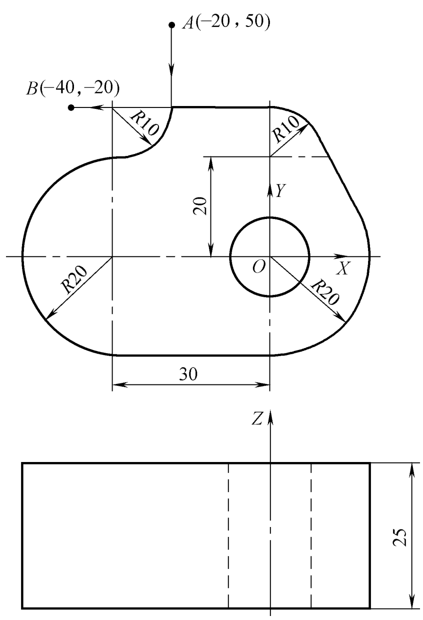


图10-37　题2图

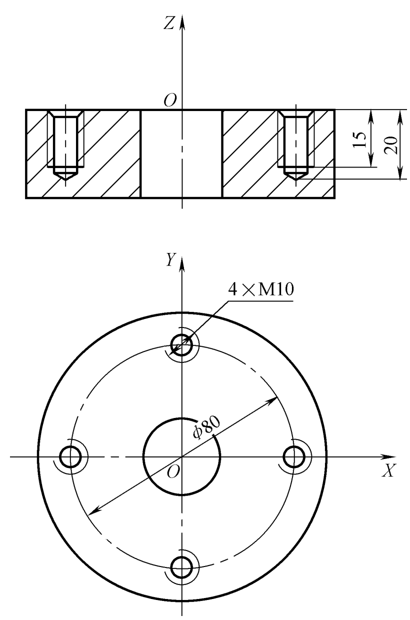
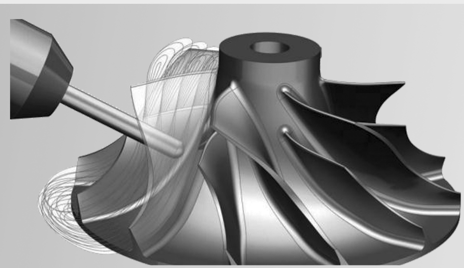


图10-38　题3图



第 11 章 宏程序及自动编程

11.1 宏程序

11.1.1 宏程序的概念

宏程序是一种特殊的子程序，适用于轨迹相同，但尺寸不同的成组零件加工，这些尺寸可以用变量来表示，在宏程序调用时进行赋值。变量除了可以进行算数运算外，还可以像计算机语言一样进行判别和循环等控制。宏程序可使程序段减少，整个加工程序只占用数控系统很少的内存。例如：铣削图 11-1 所示的矩形轮廓，设矩形长为 A，宽为 B，切削起点坐标为（X，Y）。

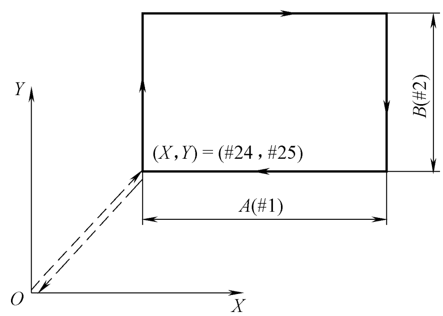


图 11-1 宏程序举例

设定：A 对应变量#1，B 对应变量#2，X 对应变量#24，Y 对应变量#25，进给速度 F 对应变量#9。不考虑刀具补偿和 Z 向进给，则宏程序为

```
O1101;                          宏程序号
G91 G00 X#24 Y#25;              快速移动到切削起点
G01 Y#2 F#9;                    +Y 方向直线进给 B 距离
X#1;                            +X 方向直线进给 A 距离
Y-#2;                           -Y 方向直线进给 B 距离
X-#1;                           -X 方向直线进给 A 距离
G00 X-#24 Y-#25;                快速返回切削起点
M99;                            宏程序结束，返回主程序
```

若当前零件尺寸 $A=50\text{mm}$、$B=30\text{mm}$，切削起点坐标 $X=40\text{mm}$、$Y=20\text{mm}$，主轴转速为 600r/min，进给速度为 100mm/min，则主程序为

```
O1102;                                      主程序
G54 G17 G90 G00 X0 Y0;
S600 M03;
G65 P1101 A50.0 B30.0 X40.0 Y20.0 F100;     调用宏程序并赋值
```

M30;　　　　　　　　　　　　　　　　　主程序结束

主程序中，G65 为宏程序调用指令，P 为被调用的宏程序号。由此可见，当加工同一类且尺寸不同的工件时，只需在调用宏程序时进行赋值即可，而没有必要针对每一个零件都编制一个程序。对一些有规律性的数控加工，只要找出相互间的数学关系，设置相应的变量，进行一定的运算和条件控制，就可以编制宏程序。实际上，数控车削程序中的单一和复杂形状固定循环指令、数控铣削程序中的型腔固定循环指令及孔加工程序中的固定循环指令等，本质上都是数控系统固化的宏程序，用专用的指令和参数变量来指定。

11.1.2　变量及运算控制

1. 变量及运算

FANUC 数控系统中，赋值地址与变量的对应关系见表 11-1，变量算数运算见表 11-2。

表 11-1　赋值地址与变量的对应关系

赋值地址	宏程序中的变量	赋值地址	宏程序中的变量
A	#1	Q	#17
B	#2	R	#18
C	#3	S	#19
I	#4	T	#20
J	#5	U	#21
K	#6	V	#22
D	#7	W	#23
E	#8	X	#24
F	#9	Y	#25
H	#11	Z	#26
M	#13		

表 11-2　变量算数运算

功能	格式	功能	格式
定义、置换	#i=#j	反余弦	#i=ACOS[#j]
加法	#i=#j+#k	反正切	#i=ATAN[#j]
减法	#i=#j-k	平方根	#i=SQRT[#j]
乘法	#i=#j * k	绝对值	#i=ABS[#j]
除法	#i=#j/#k	舍入	#i=ROUND[#j]
正弦	#i=SIN[#j]	指数函数	#i=EXP[#j]
余弦	#i=COS[#j]	对数	#i=LN[#j]
正切	#i=TAN[#j]	上取整	#i=FIX[#j]
反正弦	#i=ASIN[#j]	下取整	#i=FUP[#j]

表 11-2 中，上取整是指无条件舍去小数部分，下取整是指小数部分进位到整数。例如：变量#3=1.3，执行#1=FIX[#3]后，取 1.0 赋值给#1；执行#1=FUP[#3]后，取 2.0 赋值给#1。

2. 循环控制

（1）无条件转移（GOTO 语句）　转移（跳转）到标有行号的程序段。格式为

GOTO n;　　n 为行号($n=1\sim99999$)

(2) 条件转移 (IF 语句)　若指定的条件满足，则跳转到标有行号的程序段；若不满足指定的条件表达式，则顺序执行下一程序段。格式为

IF[<条件表达式>] GOTO n;n 为行号($n=1\sim9999$)

(3) 循环 (WHILE 语句)　若指定的条件满足，则执行从 DO 到 END 之间的程序；若不满足指定的条件表达式，则转到 END 后的程序段。格式为：

WHILE[<条件表达式>] DO GOTO m;　　m 为循环层标号($m=1,2,3$)

⋮

END m

DO 循环可以有三层嵌套，但 DO 的范围不能有重叠。条件表达式通过运算符对变量和变量，或变量和常数之间的大小进行比较，运算符见表 11-3。

表 11-3　运算符

运　算　符	含　　义	条件表达式
EQ	等于(=)	[#i EQ #j]
NE	不等于(≠)	[#i NE #j]
GT	大于(>)	[#i GT #j]
GE	大于或等于(≥)	[#i GE #j]
LT	小于(<)	[#i LT #j]
LE	小于或等于(≤)	[#i LE #j]

11.1.3　宏程序的应用

1. 沿圆周均布的孔群加工

图 11-2 中，孔沿半径为 r 的圆周均匀分布，孔的数量为 n，分布圆圆心坐标为 (x_0，y_0)，第 1 个孔与 X 轴的夹角 (即孔群的起始角) 为 α，各孔间隔角度为 β，角度的方向以逆时针为正，顺时针为负。

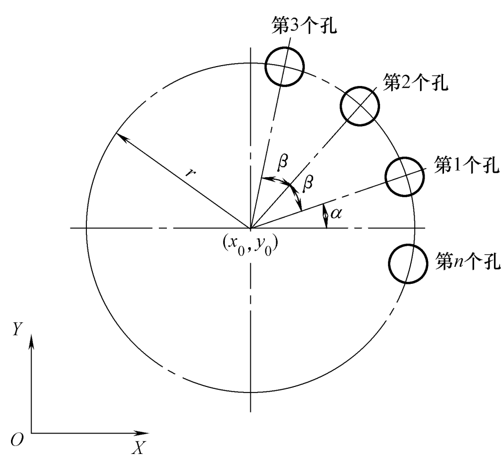


图 11-2　沿圆周均布的孔群

主程序：

O1103;

G54 G90 G00 X0 Y0 Z30.0;

S1000 M03;

G65　P1104　X50.0　Y20.0　Z－10.0　R2.0 F200 A22.0 B45.0 I20.0 H8.0;

M30;

变量赋值说明：

#1＝ (A)：第 1 个孔与 X 轴的角度 α。

#2＝ (B)：各孔间隔角度 β。

#4＝ (I)：分布圆半径 r。

#9＝ (F)：孔加工进给速度。

#11＝（H）：分布孔的数量 n。

#18＝（R）：孔加工固定循环中 R 平面坐标值。

#24＝（X）：分布圆圆心坐标 x_O。

#25＝（Y）：分布圆圆心坐标 y_O。

#26＝（Z）：孔底 Z 坐标值。

宏程序：

O1104；	宏程序号
#3＝1；	孔序号计数置 1，从第 1 个孔开始
WHILE ［ #3 LE#11 ］ DO 1；	如果孔序号（#3）≤孔的数量（#11），则循环 1 继续
#5＝#1+［ #3-1 ］ ＊#2；	计算第 3 个孔对应的与 X 轴的角度
#6＝#24+#4＊COS［ #5 ］；	计算第 3 个孔中心的 X 坐标值
#7＝#25+#4＊SIN［ #5 ］；	计算第 3 个孔中心的 Y 坐标值
G98 G81 X#6 Y#7 Z#26 R#18 F#9；	G81 钻孔循环，钻第 3 个孔
#3＝#3+1；	孔序号递增 1
EDN 1；	循环 1 结束
G80；	撤销固定循环
M99；	宏程序结束，返回主程序

2. 矩形周边外斜面加工

矩形周边外斜面如图 11-3 所示。

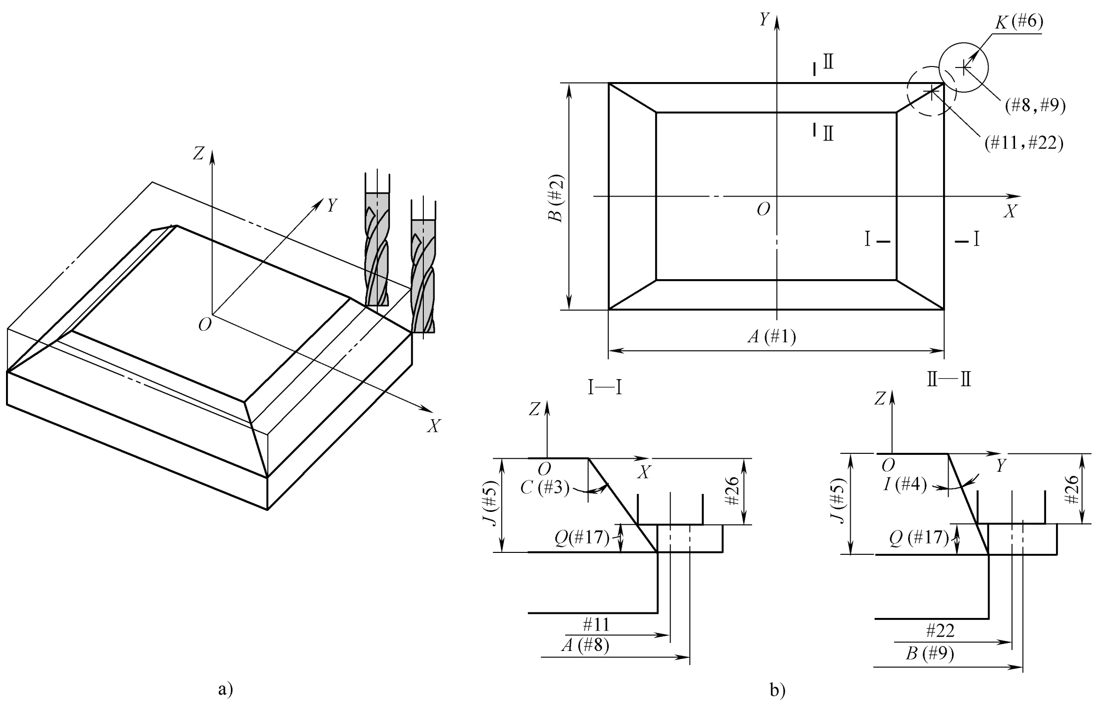


图 11-3　矩形周边外斜面

a）加工示意图　b）变量设置

设定工件坐标系在工件顶面对称中心，切削起点在工件外斜面底部右上角，由平底立铣刀由下至上逐层切削，坐标值以刀具中心为依据。

变量赋值说明：

#1＝（A）：斜面底部 *X* 方向的尺寸。

#2＝（B）：斜面底部 *Y* 方向的尺寸。

#3＝（C）：左右斜面与垂直面之间的夹角。

#4＝（I）：前后斜面与垂直面之间的夹角。

#5＝（J）：斜面高度。

#6＝（K）：铣刀半径。

#17＝（Q）：*Z* 方向每层递增量。

宏程序：

```
S1000 M03;
G54 G90 G00 X0 Y0 Z30.0;          刀具到达斜面顶部上方 30mm 安全高度
#7=0;                             第 1 次切削，Z 初始值为 0
#8=#1/2+#6;                       刀具中心在工件外斜面底部右上角的 X 坐标值
#9=#2/2+#6;                       刀具中心在工件外斜面底部右上角的 Y 坐标值
G00  X#8  Y#9;                    刀具快速定位到工件右上角
WHILE [ #7 LE #5] DO 1;
#26=-#5+#7;                       当前层 Z 坐标值
#11=#8-#7*TAN [ #3];              当前层 X 方向刀具中心到工件原点的距离
#22=#9-#7*TAN [ #4];              当前层 Y 方向刀具中心到工件原点的距离
G01 Z#26;                         刀具 Z 方向往上进给到当前层
X#11 Y#22 F300;                   刀具偏移到当前层切削起点
Y-#22;                            当前层矩形轮廓切削
X-#11;
Y#22;
X#11;
#7=#7+#17;                        当前层切削后 Z 方向递增累积量
END 1;                            当#5=#7（层切到达斜面顶部）时，循环 1 结束
G00 Z30.0;                        刀具退刀至安全高度
M99;                              程序结束
```

11.2 自动编程

11.2.1 自动编程概述

本书前述的编程方法均为手工编程，在点位加工以及一些简单的轮廓加工中，手工编程仍广泛应用，表现为坐标点的计算较为简单，特别是固定循环指令以及子程序和宏程序的使用，使程序编制灵活。但对于形状复杂的零件，特别是非圆曲线、列表曲线及由曲面组成的

零件，如复杂型腔和叶片等，手工编程就很困难，甚至无法编程，必须借助计算机用 CAD/CAM 软件进行自动编程。编程人员根据 CAD 软件生成的二维或三维图形，通过人机对话，选择毛坯、刀具及加工路径等参数；使用 CAM 软件对被加工零件表面进行刀位计算后生成一个可读的刀位源程序文件，该文件经后置处理后生成针对不同数控系统格式要求的加工程序；再将加工程序通过数据线、外存储设备或工厂局域网输入到数控系统中，数控系统运行加工程序，控制机床加工出所要求的零件。图 11-4 所示为基于 CAD/CAM 技术的数字化制造过程，图 11-5 所示为自动编程流程。

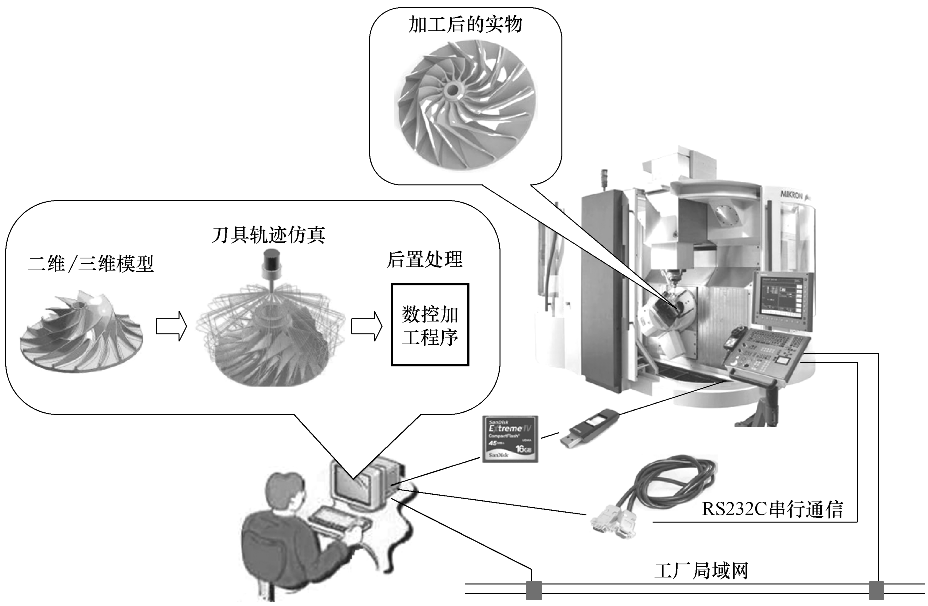


图 11-4 基于 CAD/CAM 技术的数字化制造过程

目前，高档 CAD/CAM 软件有 NX、Pro/E、CATIA 等。这类软件的特点：优越的参数化设计、变量化设计以及实体和曲面造型技术；加工方式完备，计算准确，实用性强，可以从简单的 2 轴加工到 5 轴联动加工复杂工件表面；可以对数控加工过程进行自动控制和优化；提供二次开发工具供用户扩展功能。中档的 CAD/CAM 软件有 SolidWorks、MasterCAM、CAXA 等。这类软件的特点有实用性强、用户界面灵活、三维造型及工程绘图功能优良、具有各种通用和专用接口以及产品数据管理集成化等。

不管采用何种 CAD/CAM 软件，CAM 的功能就是根据 CAD 提供的模型，生成刀具刀位点轨迹（也称刀轨），经后置处理后自动生成加工程序。

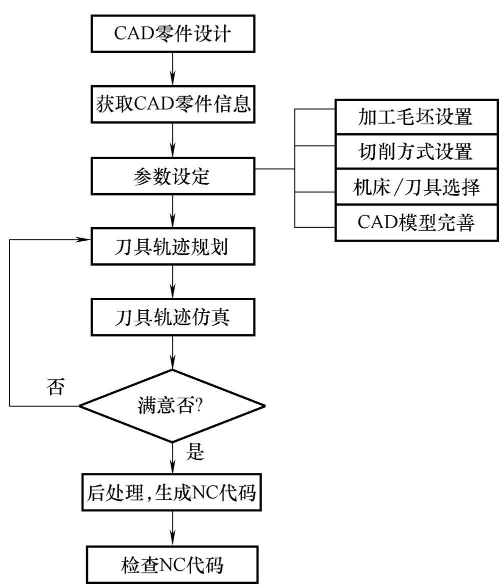


图 11-5 自动编程流程

11.2.2 自动编程案例

以鼠标顶面加工为例，在 NX 软件中，通过对话框，以“操作”和“操作参数”的方式设置被加工零件的几何模型、毛坯模型、刀具、切削方式和切削工艺等，由计算机生成刀具轨迹并进行切削仿真，最后经后置处理由计算机自动生成数控加工程序。图 11-6~图 11-8 所示分别为三维模型、精加工刀轨及经后置处理生成的加工程序。

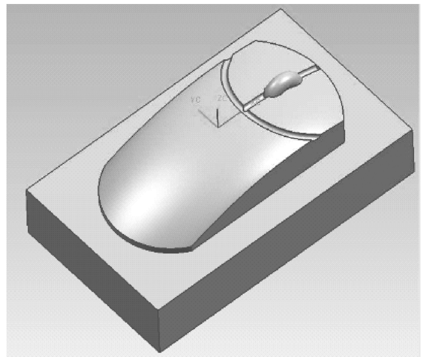


图 11-6　三维模型

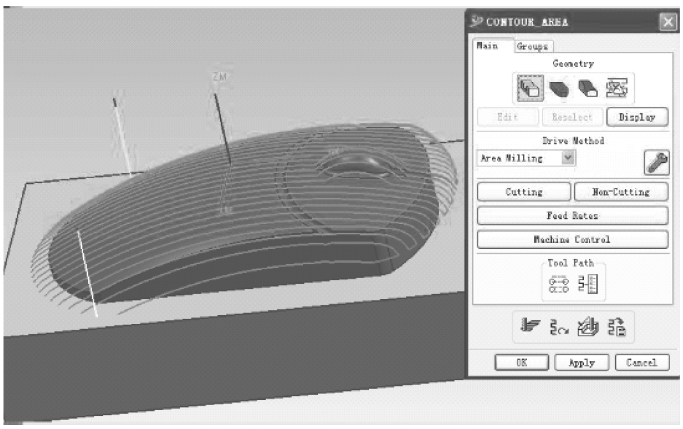


图 11-7　精加工刀轨

```
( Part File Name: F:\shencg\individual\Teaching\Compete_06\Part_ShuB:
N0010 G90 G0 G40 G17 G80
( Path Name  : ROUGH_MILL )
( Tool Number: 11 )
( Tool Name  : D16R0  Tool Diameter: 16.000  Tool Length: 70.000 )
:0020 T11 M6
N0030 T12
N0040 G0 X40.736 Y-52.593 S1000 M3
N0050 H00 Z7.5
N0060 Z3.
N0070 Z1.056
N0080 Z-1.944
N0090 X35.944 Y-55.422
N0100 G2 X31.316 Y-57.937 I37.877 J-64.18 F250.
N0110 G0 X25.081 Y-61.045
N0120 Z1.056
N0130 Z3.
N0140 X-24.542
N0150 Z1.056
N0160 Z-1.944
N0170 X-30.763 Y-58.009
N0180 G2 X-36.291 Y-55.015 I-32.58 J-66.751
N0190 G0 X-40.799 Y-52.32
N0200 Z1.056
N0210 Z3.
N0220 X41.045 Y-42.157
N0230 Z1.056
N0240 Z-1.944
```

图 11-8　经后置处理生成的加工程序（部分）

进一步了解 CAD/CAM，请读者参考相关书籍和资料。

思考题与习题

1. 用平底立铣刀对球面进行粗加工，刀具从球面底部逐层往上进行切削，如图 11-9 所示。

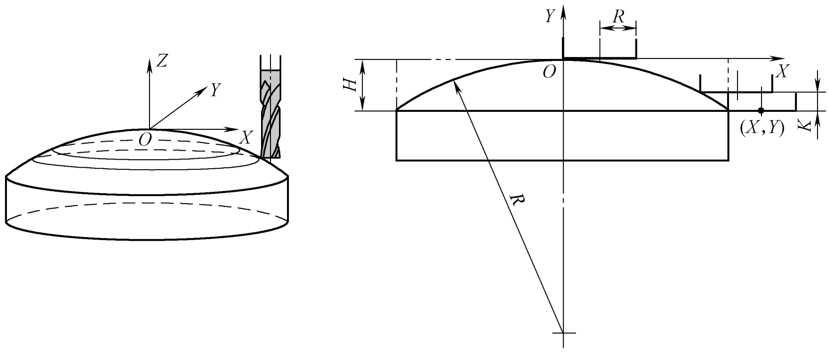


图 11-9 题 1 图

设定工件坐标系原点在球面顶部中心，球半径变量地址为 R，球面高度变量地址为 H，每层行距变量地址为 K，刀具半径变量地址为 D。请完成：

1）通过宏程序变量，计算当前层刀具中心的 X、Y 坐标值。

2）规划加工路径，编写加工宏程序。

3）若用半径为 r 的球头铣刀进行分层精加工切削，且层与层之间的切削残余高度 $\leqslant\delta$，计算当前层球头铣刀刀位点 X、Y 坐标值。

2. 根据第 10 章例 10-5 关于平面双向多次切削及程序介绍，用宏程序编写加工程序。各参数如图 11-10 所示，平面长度变量为 A，宽度为 B，切入和切出安全距离变量为 C，刀具直径变量为 D。

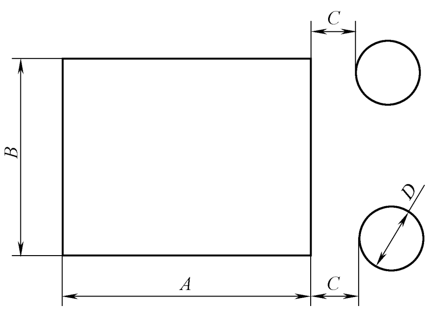


图 11-10 题 2 图

3. 用 CAD/CAM 软件进行自动编程要经历哪些过程？后置处理的目的是什么？

参考文献

［1］ 吴祖育. 数控机床［M］. 上海：上海科学技术出版社，2006.
［2］ 陈廉清. 数控机床［M］. 北京：机械工业出版社，2008.
［3］ 王明红. 数控技术［M］. 北京：清华大学出版社，2009.
［4］ 李恩林. 数控技术原理及应用［M］. 北京：国防工业出版社，2006.
［5］ 邵泽强，陈庆胜. 数控机床电气线路装调［M］. 北京：机械工业出版社，2012.
［6］ 龚仲华. FANUC 0iD 选型与设计［M］. 北京：机械工业出版社，2013.
［7］ 陈先锋. SINUMERIK 802D Solution Line 综合应用教程［M］. 北京：人民邮电出版社，2011.
［8］ 张泰华. SINUMERIK 840Dsl 数控系统调试与应用［M］. 北京：机械工业出版社，2015.
［9］ 晏初宏. 数控机床与机械结构［M］. 北京：机械工业出版社，2005.
［10］ 熊光华. 数控机床［M］. 北京：机械工业出版社，2012.
［11］ 侯培红. 数控技术及其应用［M］. 上海：上海交通大学出版社，2015.
［12］ 郑堤. 数控机床与编程［M］. 北京：机械工业出版社，2005.
［13］ 于万成. 数控加工工艺与编程基础［M］. 北京：人民邮电出版社，2006.
［14］ 周兰. 数控车削编程与加工［M］. 北京：机械工业出版社，2010.
［15］ 陈海舟. 数控铣削加工宏程序及应用实例［M］. 北京：机械工业出版社，2006.
［16］ 梁森，欧阳三泰，王侃夫. 自动检测技术及应用［M］. 2 版. 北京：机械工业出版社，2015.
［17］ 杨叔子，杨克冲. 机械工程控制基础［M］. 6 版. 武汉：华中科技大学出版社，2013.
［18］ 林孔元，王萍. 电气工程学概论［M］. 北京：高等教育出版社，2009.
［19］ 乌尔里希·森德勒. 工业 4.0［M］. 邓敏，李现民，译. 北京：机械工业出版社，2015.
［20］ 刘践丰，等. 先进制造技术的发展趋势［J］. 机械制造与研究，2008，37（2）：78-80.

Numerical Control

Technology and Application

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88379833
读者购书热线：010-88379649
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金书网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版

机工教育微信服务号

ISBN 978-7-111-58213-7
策划编辑◎吉玲 / 封面设计◎张静

ISBN 978-7-111-58213-7
9 787111 582137 >
定价：35.00元